



Universidade de Aveiro
2010

Departamento de Ambiente e
Ordenamento

**Cláudia Alexandra
Barreira Pimentel**

**Modelação da Influência da Vegetação Urbana na
Qualidade do Ar**



Universidade de Aveiro
2010

Departamento de Ambiente e
Ordenamento

**Cláudia Alexandra
Barreira Pimentel**

**Modelação da Influência da Vegetação Urbana
na Qualidade do Ar**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Prof.^a Doutora Ana Isabel Miranda, Professora Associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, e co-orientação do Prof. Doutor Manuel Joaquim Sabença Feliciano, Professor Adjunto da Escola Superior Agrária de Bragança.

o júri

presidente

Professor Doutor Carlos Alberto Diogo Soares Borrego
Professor Catedrático do Departamento de Ambiente da Universidade de Aveiro

Professora Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda
Professora Associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da
Universidade de Aveiro

Professor Doutor Manuel Joaquim Sabença Feliciano
Professor Equiparado a Assistente do Departamento de Ambiente e Recursos
Naturais da Escola Superior Agrária de Bragança

Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

agradecimentos

No desenvolvimento desta dissertação, pude contar com o apoio e colaboração importante de várias pessoas, sendo assim, resta-me deixar-lhes expressa neste documento uma palavra amiga.

À minha orientadora Professora Ana Isabel que me inspirou, incentivou e corrigiu, contribuindo para a melhoria contínua deste trabalho.

Ao meu co-orientador Professor Manuel Feliciano, pela hospitalidade e disponibilidade demonstradas ao longo deste ano.

Ao Richard Tavares pela partilha de conhecimentos e disponibilidade.

Aos Filipes de Bragança, pela ajuda na contagem do tráfego, medições da qualidade do ar e partilha de conhecimentos.

Ao Projecto GreenUrbe, pela possibilidade de integrar e contribuir para o seu desenvolvimento.

Aos meus pais, que estiveram do meu lado e tiveram a paciência necessária para me acompanhar neste último ano de trabalho.

À restante família pelas palavras e sorrisos, motivadores e reconfortantes.

Ao Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, em especial à Engenheira Marisa Almeida pela compreensão das minhas ausências, quando necessitei de me dedicar mais intensivamente à produção desta dissertação.

Ao pessoal do Porto que me proporcionou momentos importantes de descontração que me permitiram trabalhar com mais energia e eficácia.

Às amigas de sempre, pelo socorro, auxílio e amparo que me fizeram chegar com carinho e à amizade que nos une.

Aos amigos de curso que disponibilizaram o seu tempo e atenção em momentos decisivos, de formatação e impressão, tornaram mais leve a finalização deste longo percurso e principalmente pela amizade sincera.

Um muito obrigada a todos! =)

palavras-chave

Modelação; Vegetação; Qualidade do Ar; PM₁₀; Tráfego.

resumo

O objectivo principal desta dissertação é compreender e quantificar a influência da vegetação urbana na qualidade do ar, com recurso a ferramentas de modelação. Para tal, recorreu-se ao modelo de Computação da Dinâmica de Fluidos (CFD) Envi-met, sendo este um *software* com capacidade de modelação de escoamentos complexos, existentes nas zonas urbanas. O Envi-met tem a capacidade de simular a influência da vegetação no escoamento atmosférico, sendo que a descrição da vegetação se baseia na distribuição vertical de densidade de área foliar (LAD).

A área de estudo escolhida foi a cidade de Bragança, em particular a zona da Praça Cavaleiro Ferreira, por ser um local com bastante vegetação e tráfego automóvel. Foram realizadas medições de qualidade do ar e contagens de tráfego para a área escolhida, nos dias 8 e 9 de Julho de 2009.

Para verificar a aplicabilidade do Envi-met ao caso de estudo, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos e os dados de qualidade do ar medidos para o dia 9 de Julho. O estudo do efeito da vegetação foi realizado para o dia 9 de Julho de 2009, através da variação das características da densidade de área foliar, para duas situações distintas: as observadas no dia de estudo e na ausência de vegetação.

Verifica-se que a existência de vegetação contribui para uma diminuição da temperatura, e que de maneira geral a sua ausência aumenta a velocidade do vento, mas é preciso ter em conta que estes efeitos são muito localizados e que a alteração das características físicas dos espaço e meteorológicas pode levar a resultados diferentes.

Keywords

Modelling; Vegetation; Air Quality; PM₁₀; Traffic.

abstract

The main goal of this dissertation is to understand and quantify the influence of the urban vegetation on the air quality, using modelling tools. To this end, we used the model of Computation Fluid Dynamics (CFD) Envi-met, which is a software capable of modelling complex drainings, in urban areas. The Envi-met has the ability to simulate the vegetation influence of the atmospheric draining, being that the description of vegetation is based on the vertical distribution of leaf area density (LAD).

The study area chosen was the city of Bragança, in particular the area of the Plaza Cavaleiro Ferreira, for being a place with lots of vegetation and car traffic. Measurements of air quality and traffic counts were done for the selected area on July 8th and 9th of 2009.

In order to verify the applicability of the Envi-met to the case study, was performed a comparison between results and air quality data, measured for day 9 of July. The study of the vegetation effect was carried out for this day, through the variation of the density leaf area characteristics for two distinct situations: those observed on the day of study and in the absence of vegetation.

It is verified that the presence of vegetation contributes to a temperature decrease, and that generally its absence increases the wind speed, but we must bear in mind that these effects are very localized and that the change of the space and weather physical characteristics can lead to different results.

Índice Geral

Índice Geral.....	i
Índice de Figuras.....	iii
Índice de Tabelas	vii
Lista de Abreviaturas	ix
1 Introdução.....	1
2 Importância da vegetação urbana	5
2.1 A vegetação urbana e o planeamento	6
2.2 A vegetação urbana e a Qualidade do Ar	7
3 Modelação da qualidade do ar em zonas urbanas com vegetação	13
3.1 O efeito da vegetação	14
3.2 O modelo Envi-met.....	15
3.2.1 Descrição numérica do modelo Envi-met	16
3.2.2 Parametrização da vegetação	18
3.2.3 Condições fronteira e dados de entrada	19
4 O Caso de estudo.....	21
4.1 Caracterização da cidade de Bragança.....	21
4.2 Campanha de medição	24
5 Aplicação do Envi-met.....	33
5.1 Domínio de simulação	33
5.2 Condições de aplicação – dados de entrada	36
5.3 Dados da vegetação.....	37
5.4 Emissões do tráfego automóvel	38
5.5 Apresentação e análise de resultados	40
5.5.1 Validação	40
5.5.2 O efeito da vegetação	44
6 Conclusão.....	53
Referências bibliográficas.....	55
Anexo A – Contagens de Tráfego	59
Anexo B – Aplicação do modelo Envi-met no caso de estudo	61

Índice de Figuras

Figura 3.1 - Distribuição do vento em redor da vegetação numa savana. A linha a cheio representa o perfil de velocidade do vento numa zona não perturbada, enquanto que a linha a tracejado é o perfil de velocidade do vento após a vegetação (Vareschi, 1960).	15
Figura 3.2 - Fluxo de dados do Envi-met 3.1 (Bruse, 2008).	20
Figura 4.1 - Mapa do distrito de Bragança (URL1).	22
Figura 4.2 - Distribuição espacial das emissões de PM ₁₀ na Região Norte (CCDR-N).....	24
Figura 4.3 - Área de estudo da cidade de Bragança	25
Figura 4.4 - Equipamento de medição do Índice de Área Foliar (LAI) – Ceptómetro AccuPAR LP-80.....	26
Figura 4.5 – Medição de parâmetros meteorológicos e de PM ₁₀ na área de estudo.....	27
Figura 4.6 - Valores médios horários da temperatura ao longo do dia	28
Figura 4.7 - Valores médios horários da humidade relativa ao longo do dia	28
Figura 4.8 - Valores médios da velocidade do vento ao longo do dia.....	29
Figura 4.9 - Valores médios de direcção do vento ao longo do dia	29
Figura 4.10 - Monitor ADR-1200s.	30
Figura 4.11 - Valores da concentração de PM ₁₀ ao longo do dia.....	31
Figura 4.12 - Distribuição espacial das concentrações de PM ₁₀ na cidade de Bragança..	32
Figura 5.1 - Praça Cavaleiro Ferreira.....	34
Figura 5.2 - Área aproximada do domínio de simulação	35
Figura 5.3 - Representação da rede de tráfego do domínio de estudo.....	39
Figura 5.4 - Caudal mássico (g.h ⁻¹) de emissão de PM ₁₀ , estimado pelo TREM, para as várias ruas do domínio.....	40
Figura 5.5 - Comparação dos valores de PM ₁₀ simulados e registados no local de estudo na estação de monitorização, no dia 9 de Julho de 2009.....	41
Figura 5.6 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 7:30 do dia 9 de Julho de 2009.	42
Figura 5.7 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 17:30 do dia 9 de Julho.....	43
Figura 5.8 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 10:30 do dia 9 de Julho de 2009.	44
Figura 5.9 - Gráfico comparativo dos valores de PM ₁₀ simulados para as condições	

originais e sem vegetação.....	45
Figura 5.10 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 11:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referencia; b) sem vegetação.....	46
Figura 5.11- Campo horizontal de velocidade do vento (altura 2 m) às 11:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referencia; b) sem vegetação.....	48
Figura 5.12 - Campo horizontal da temperatura (altura 2 m) às 14:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referencia; b) sem vegetação	50
Figura B 1 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 8:30 do dia 9 de Julho de 2009.....	61
Figura B 2- Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 9:30 do dia 9 de Julho de 2009.....	62
Figura B 3 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 14:30 do dia 9 de Julho de 2009.....	62
Figura B 4 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 15:30 do dia 9 de Julho de 2009.....	63
Figura B 5 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 16:30 do dia 9 de Julho de 2009.....	63
Figura B 6 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 18:30 do dia 9 de Julho de 2009.....	64
Figura B 7 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 9:30 do dia 9 de Julho de 2009, sem vegetação.....	64
Figura B 8 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 10:30 do dia 9 de Julho de 2009, sem vegetação.....	65
Figura B 9 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 14:30 do dia 9 de Julho de 2009, sem vegetação.....	65
Figura B 10 - Campo horizontal de concentrações de PM ₁₀ (altura 2 m) às 15:30 do dia 9 de Julho de 2009, sem vegetação.....	66
Figura B 11 - Campo horizontal da temperatura (altura 2 m) às 9:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação	67
Figura B 12 - Campo horizontal da temperatura (altura 2 m) às 9:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação.	68
Figura B 13 - Campo horizontal da temperatura (altura 2 m) às 11:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação.	69
Figura B 14 - Campo horizontal da temperatura (altura 2 m) às 15:30 do dia 9 de Julho de	

2009. a) situação de referência; b) sem vegetação.....	70
Figura B 15 - Campo horizontal de velocidade do vento (altura 2 m) às 9:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação	71
Figura B 16 - Campo horizontal de velocidade do vento (altura 2 m) às 10:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação	72
Figura B 17 - Campo horizontal de velocidade do vento (altura 2 m) às 14:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação	73
Figura B 18 - Campo horizontal de velocidade do vento (altura 2 m) às 10:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação	74

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Benefícios proporcionados pelas árvores e florestas urbanas (adaptado de Tyrväinen <i>et al.</i> , 2005).	5
Tabela 4.1 - Valores de LAI medidos para as espécies florestais dominantes na área de estudo.....	26
Tabela 4.2 – Horas das medições.....	32
Tabela 5.1 – Valores de velocidade do vento calculados para uma altura de 10 metros..	36
Tabela 5.2 - Valores de LAI medidos	37
Tabela 5.3 - Valores de LAD para as diferentes árvores.....	38
Tabela 5.4 - Comparação dos valores de PM ₁₀ simulados pelo Envi-met e medidos no local de estudo.	41
Tabela A 1 – Exemplo de dados referentes às contagens de tráfego realizadas	59

Lista de Abreviaturas

CCDR-N	Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte
CFD	Computação da Dinâmica de Fluidos
CO	Monóxido de Carbono
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
COVB	Compostos Orgânicos Voláteis Biogénicos
EC	European Commission
INE	Instituto Nacional de Estatística
LAD	Densidade de área foliar
LAI	Índice de área foliar
NOx	Óxidos de Azoto
OMS	Organização Mundial de Saúde
PM	Matéria Particulada
PM ₁₀	Partículas em Suspensão com diâmetro inferior a 10 µm
PNAAS	Plano Nacional de Acção Ambiente e Saúde
TSP	Partículas Totais em Suspensão
UTAQS	Índice de Qualidade do Ar para Árvores Urbanas
WHO	World Health Organization

1 Introdução

O crescente aumento das emissões de poluentes para a atmosfera a nível mundial, pelo qual o desenvolvimento industrial e urbano é responsável, tem levado a um acréscimo das concentrações destas substâncias no ar ambiente e à sua deposição no solo, na água, na vegetação e nos materiais, estando na origem de efeitos adversos na saúde.

Análises estatísticas de dados de recenseamento, relativos ao período de 1950 a 2000, permitiram verificar que, associada a uma duplicação da população mundial, ocorreu uma quadruplicação da população de tipo urbano, sendo que na União Europeia cerca de 80% dos cidadãos vivem actualmente em zonas urbanas (WHO, 1999; EC, 2000). Esta rápida urbanização, tão característica dos países em desenvolvimento, juntamente com o aumento da intensidade do tráfego automóvel, tem desencadeado mecanismos de deterioração do ambiente urbano e, em particular, do ar envolvente com consequentes efeitos sobre a saúde humana, associados à presença de concentrações elevadas de óxidos de azoto (NO_x), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV) e partículas (PM).

As partículas atmosféricas têm assumido uma maior importância de investigação devido ao facto de para além de ser um poluente cujos efeitos são mais relevantes para a saúde humana, não existe, contrariamente à maioria dos poluentes, nenhum limiar de exposição do qual a exposição a partículas não origine efeitos (WHO, 2002)

As partículas têm vindo a ser caracterizadas de várias maneiras, desde a concentração em massa total (TSP - *total suspended particulate*), às suas fracções como as PM_{10} ou $\text{PM}_{2.5}$. A fracção $\text{PM}_{2.5}$ (ou fracção fina) é a fracção de partículas com

diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 μm , enquanto que PM_{10} é a fracção com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 μm . A fracção ultra-fina é a que se encontra abaixo de 0,1 μm (WHO, 2000).

De acordo com uma recente e extensa revisão da Organização Mundial de Saúde (OMS) sobre esta matéria, as partículas atmosféricas *per si* são consideradas responsáveis pelos efeitos na saúde reportados em abrangentes estudos epidemiológicos, os quais relacionam as concentrações atmosféricas das partículas com mortalidade e morbilidade (WHO, 2003). A exposição às partículas está associada a vários problemas de saúde que vão desde problemas pulmonares a cardiovasculares, podendo até conduzir à morte. Um dos efeitos de exposições prolongadas a níveis elevados de partículas é uma redução significativa da esperança média de vida. Os efeitos mais graves verificam-se, normalmente, entre os grupos mais vulneráveis, como as crianças, os idosos e os asmáticos (PNAAS, 2007).

A exposição humana a partículas pode suscitar, quer respostas agudas, quer crónicas. Os efeitos agudos, em indivíduos saudáveis, podem ser confinados a adaptações fisiológicas reversíveis resultantes de mecanismos de defesa naturais (por exemplo, olhos aguados, tosse ou uma diminuição da função pulmonar). Os efeitos agudos podem, no entanto, também aumentar a gravidade ou duração de uma infecção respiratória já estabelecida ou de doenças tais como asma ou doença pulmonar obstrutiva crónica que já colocou o indivíduo numa posição vulnerável, e aumentar o risco de admissão hospitalar ou mesmo a morte prematura. Por outro lado, se o indivíduo apresentar uma condição terminal crónica, como a doença pulmonar crónica obstrutiva ou insuficiência cardíaca congestiva, a exposição à poluição do ar pode levar à morte apenas num curto espaço de tempo, sendo esta iminente, em qualquer caso (Samet *et al.*, 1998).

Desde o início dos anos 80 a preservação de uma boa Qualidade do Ar ambiente tem sido uma preocupação prioritária nos trabalhos da União Europeia, que tem criado várias medidas legislativas. Para o cumprimento dessa legislação têm vindo a ser implementados vários programas de melhoria da Qualidade do Ar nas cidades, que envolvem a utilização de autocarros eléctricos e a gás, e de veículos automóveis híbridos, a imposição de limites de emissão de poluentes às indústrias, o incentivo a energias renováveis, etc. Contudo, estas medidas nem sempre se revelam eficazes e suficientes e, devido às excedências aos valores limite da legislação da Qualidade do Ar, que se continuam a verificar, terão de ser adoptadas mais medidas para diminuir a

emissão de poluentes.

A solução da deterioração da Qualidade do Ar passa também pela concepção e implementação de novos modelos de organização do espaço urbano, nos quais os espaços verdes devem surgir como elementos fundamentais do novo paradigma de sustentabilidade urbana. A valorização destes espaços surge como uma medida de mitigação dos efeitos adversos da urbanização do ponto de vista do desenvolvimento sustentável, tornando as cidades mais atractivas, ao invés da periferia, e reduzindo a necessidade de recurso a meios de transporte (Ridder *et al.*, 2004).

A vegetação nos centros urbanos, como os parques, a arborização das ruas, avenidas e praças públicas, os jardins públicos ou particulares, proporcionam áreas de lazer, de prática desportiva e estudo. Esta vegetação pode afectar directa ou indirectamente a qualidade do ar, alterando o ambiente atmosférico urbano.

Inúmeros estudos têm vindo a provar que a transpiração e a própria disposição da copa das árvores afectam as condições micrometeorológicas locais. No âmbito da mitigação da poluição ambiental, um corredor verde foi definido como “ uma faixa de árvores de determinadas espécies e determinada geometria que, quando plantadas junto a uma fonte de poluição, atenuam significativamente a poluição pela intercepção e absorção dos poluentes de uma maneira sustentável” (Ruth e William, 1994). Na realidade, os corredores verdes incluem outro tipo de vegetação, em particular sebes e arbustos, que também têm o seu papel na captura de poluentes (Faisal, 1999).

Um espaço verde devidamente desenhado e planeado pode ser usado como uma “biotecnologia” natural para reduzir alguns efeitos adversos no ambiente e saúde, associados à urbanização. Com a urbanização a expandir-se, há uma urgente necessidade de incorporar os efeitos da vegetação urbana na redução destes malefícios em planeamentos, políticas e regulamentos, a longo prazo, de forma a melhorar a qualidade ambiental (Nowak, 2006).

Devido à complexidade dos fenómenos envolvidos, o efeito da vegetação urbana na qualidade do ar não está ainda completamente determinado. Neste contexto, a modelação constitui uma ferramenta fundamental para compreender e quantificar as relações existentes entre as diferentes características dos espaços verdes e a qualidade do ar em áreas urbanas.

O objectivo principal desta dissertação é compreender e quantificar a influência da vegetação urbana na qualidade do ar, com recurso a ferramentas de modelação. O

poluente considerado para este estudo é PM_{10} e utilizou-se o modelo Envi-met, aplicado à cidade de Bragança. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto Greenurbe – Os impactes dos Espaços Verdes na Qualidade do Ambiente Urbano (PPCDT/AMB/59174/2004, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

Este documento encontra-se estruturado em seis capítulos. Sendo este o primeiro, o segundo capítulo versa a importância da vegetação urbana na qualidade do ar. O terceiro capítulo refere-se à modelação da qualidade do ar em zonas urbanas com vegetação, à escolha do modelo Envi-met e à sua descrição. No quarto capítulo apresenta-se o caso de estudo seleccionado, a cidade de Bragança, e a campanha de medição de dados meteorológicos, qualidade do ar e de tráfego. O quinto capítulo consiste na aplicação do modelo Envi-met, descrevendo-se o domínio de simulação, as condições de aplicação e os dados necessários, sendo realizada a sua validação, com a apresentação e análise dos resultados. No último capítulo são apresentadas as conclusões.

2 Importância da vegetação urbana

A apreciação dos benefícios proporcionados pelas árvores e florestas urbanas pode diferir de cidade para cidade. Por exemplo, na Europa o recreio e os benefícios estéticos são tradicionalmente considerados mais importantes nos países nórdicos, a utilização de árvores como barreira contra ventos fortes é mais relevante a Noroeste, e a utilização da vegetação para proporcionar sombra é particularmente valorizada nos países de clima mais quente, nomeadamente os mediterrânicos (Tyrväinen *et al.*, 2005).

Com adequado planeamento, desenho e gestão, os espaços verdes, e em particular as árvores e florestas urbanas, podem proporcionar inúmeros e importantes benefícios para a sociedade, que se listam na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Benefícios proporcionados pelas árvores e florestas urbanas (adaptado de Tyrväinen *et al.*, 2005).

Benefício	Descrição
Ecológico	Impacte no clima urbano através do controlo da temperatura, do vento e da humidade. Redução da poluição do ar, do ruído, da luminosidade e da reflexão da luz, prevenção de cheias e controlo da erosão. Instalação de biótipos de flora e fauna em ambiente urbano.
Social	Oportunidades de recreio, melhoria da envolvente da habitação e do local de trabalho, impacte na saúde física e

	mental. Valores culturais e históricos das áreas verdes.
Estético	Paisagem diversificada através das cores, texturas, formas e densidades de plantas diferentes. Crescimento das árvores, dinâmica das estações e contacto da população com a natureza. Definição de espaços abertos, enquadramento de vistas de edifícios.

Os espaços verdes urbanos, podem minimizar muitos dos impactes ambientais resultantes do crescimento urbano, moderando o clima, reduzindo os consumos de energia nos edifícios, bem como as quantidades emitidas de dióxido de carbono atmosférico, melhorando a qualidade do ar, reduzindo a quantidade de águas pluviais para escoamento e assim diminuindo as inundações, baixando os níveis de ruído, e proporcionando *habitat* para a vida selvagem (McPherson *et al.*, 1994; Magalhães, 2001; Nowak, 2001).

2.1 A vegetação urbana e o planeamento

No planeamento urbano deve recorrer-se ao estudo da climatologia podendo a vegetação, através de uma boa selecção de espécies e da sua localização, contribuir de modo relevante para o “conforto urbano”. De facto, as árvores, bem como outros espaços verdes inseridos em locais com edifícios, podem baixar a temperatura do ar em 3°C, comparativamente a uma situação semelhante mas sem espaços verdes. A uma escala de clima urbano (10 km²), observaram-se diferenças de temperatura superiores a 5°C entre o centro de uma cidade e as áreas suburbanas mais arborizadas (Akbari *et al.*, 1992).

As árvores afectam o clima urbano e controlam a energia utilizada no condicionamento ambiental dos edifícios directa e indirectamente. De forma directa ensombram e reduzem a velocidade do vento, modificando assim a interacção entre o edifício e a sua envolvente, ou seja, proporcionando uma redução de temperatura do ar envolvente. De forma indirecta através do arrefecimento derivado da evapotranspiração (Akbari *et al.*, 1992). Esta diminuição da temperatura do ar pode interferir na qualidade do ar, uma vez que a emissão de vários poluentes diminui à medida que a temperatura decresce (Nowak, 2001).

Durante o Inverno, a sombra não é desejada em climas temperados e frios,

porque irá aumentar as necessidades de aquecimento. No entanto, controlar a velocidade e direcção do vento, constitui um benefício no Inverno. Por outro lado, durante o Verão, a existência de sombra contribui para o arrefecimento do ar e, consequentemente, reduz a utilização do ar condicionado nos edifícios, diminuindo o consumo de energia. Através de um planeamento estratégico, será possível maximizar os efeitos positivos para ambas as estações e minimizar os negativos (Akbari *et al.*, 1992).

A localização das árvores em relação aos edifícios, tendo em atenção o ângulo e a infiltração solar, é um ponto muito importante a ter em consideração, principalmente para os edifícios individuais. No Verão, altura em que o Sol se encontra mais baixo, durante longas horas principalmente nos lados Este e Oeste, é necessário ensombrar estes dois lados, contribuindo assim para manter o edifício mais fresco. Por outro lado, a quantidade de ar exterior que entra para o interior de um edifício pode alterar-se significativamente de acordo com a direcção e a velocidade do vento, a qual pode ser influenciada pela localização das árvores (McPherson *et al.*, 2000). No entanto, as consequências causadas pelo ensombramento no Inverno, em termos de consumos de energia, são menos significativas do que os benefícios proporcionados no Verão. Tal facto, provavelmente, deve-se à circunstância de no Inverno o Sol ser menos intenso, e as árvores caducifólias, ao perderem as suas folhas, permitirem que os raios solares atinjam os edifícios. De uma maneira geral, é preferível a utilização de espécies caducifólias do que de coníferas e folhosas com regime de folha persistente (Heisler, 1986). Conclui-se que a taxa de crescimento e a forma e densidade da copa constituem critérios importantes na selecção das melhores espécies arbóreas para ensombramento, bem como na sua correcta localização em relação ao edifício (Heisler, 1986).

O ensombramento produzido pelas árvores também provoca uma diminuição da radiação solar ultravioleta contribuindo para o decréscimo de problemas associados com o aumento da exposição à referida radiação, tais como cataratas e cancro de pele (Nowak, 2001).

O arrefecimento provocado pelo ensombramento e pela evapotranspiração pode ainda afectar outros aspectos do microclima local, como a humidade relativa, a turbulência, o albedo e a altura da camada limite, podendo estas alterações modificar a concentração de poluentes em áreas urbanas (Nowak, 2001).

2.2 A vegetação urbana e a Qualidade do Ar

Os parâmetros ambientais diferem consideravelmente consoante se trata de um

meio urbano ou não urbanizado. Entre esses parâmetros, a poluição do ar é frequentemente mais elevada nas cidades. As árvores urbanas desempenham um papel importante na eliminação ou atenuação dos efeitos dos referidos parâmetros, uma vez que conseguem neutralizar, através de processos químicos, os poluentes instáveis (ozono, óxidos de azoto e de enxofre) (Paolletti *et al.*, 2004).

Os poluentes, provenientes de várias fontes industriais e domésticas, encontram-se sob a forma de gases ou em finas partículas, muitas vezes de dimensões coloidais. Sempre que uma destas substâncias, ou mesmo uma combinação delas, ultrapasse uma certa concentração atmosférica, em geral diminuta, as sequelas são muito nocivas e frequentemente letais para algumas espécies vegetais (Meyer *et al.*, 1973).

O tipo e grau de dano, provocados pelos poluentes, dependem geralmente da época do ano (as folhas primaveris são as mais sensíveis), da natureza da substância tóxica, das condições ambientais e do tipo de espécie vegetal. Em geral, as resinosas, de folhas persistentes, sofrem mais do que as folhosas. Para além disso, certos prejuízos causados por episódios de poluição, podem provocar desfolhagens repetidas, podendo conduzir à morte da árvore por esgotamento (Fischesser, 1981).

As espécies de folha persistente, e em particular as coníferas (uma vez que estas apresentam uma maior área foliar e algumas delas mantêm os estomas abertos mesmo durante a noite), filtram melhor as poeiras do que as árvores de folha caduca; no entanto, as coníferas revelam-se mais sensíveis à poluição (Freer-Smith *et al.*, 1996).

As árvores também removem poluentes interceptando as partículas do ar. Algumas destas são absorvidas pela árvore, mas muitas partículas interceptadas ficam retidas na superfície da planta. As partículas interceptadas podem ser subsequentemente resuspensas na atmosfera, lavadas e retiradas pela chuva, ou caírem para o solo com a queda da folha ou de um galho (Nowak, 2001). Por conseguinte, a vegetação é frequentemente apenas uma retentora temporária das partículas atmosféricas.

O coberto vegetal contribui para a remoção de alguns poluentes atmosféricos, primeiro pela absorção via estomas (na superfície das folhas), embora outros gases sejam removidos pela própria superfície da planta. Podem ser absorvidos pelas finas camadas de água que se formam nas superfícies das folhas, dando origem a ácidos ou reagindo com as superfícies internas das folhas e uma vez dentro da folha processa-se a difusão do poluente, a árvore transforma-o num metabolito inofensivo através de vários processos fisiológicos (Nowak, 1993).

As árvores isoladas filtram menos poeiras do que quando organizadas em grupos ou em alinhamento. As árvores captam melhor os poluentes do ar quando se encontram localizadas próximo da fonte emissora (Tyrväinen *et al.*, 2005).

O coberto vegetal pode ainda afectar a qualidade do ar, alterando os parâmetros meteorológicos como a temperatura, a velocidade do vento na camada limite e a altura da camada de mistura. Estas alterações ocorrem porque a energia transferida entre a superfície da Terra e a atmosfera é alterada através de factores como a rugosidade da superfície, albedo e humidade do solo (Taha, 1996; Rossa *et al.*, 2005). Por exemplo, a copa das árvores numa floresta pode limitar a mistura das camadas superiores com o ar ao nível do solo, levando a melhorias significativas da qualidade do ar abaixo da copa. Contudo, se o número de fontes emissoras de poluentes abaixo da copa for elevado (por exemplo tráfego rodoviário), o espaço verde pode ter o efeito inverso ao minimizar a dispersão de poluentes, concentrando-os ao nível do solo (Nowak, 2006).

Algumas espécies arbóreas emitem compostos orgânicos voláteis biogénicos (COVBs), tais como isopreno e monoterpeno, para a atmosfera. Estes compostos isoprenóicos formam muitos constituintes vegetais, alguns dos quais de grande importância para o metabolismo vegetal. Os óleos essenciais constituem um amplo grupo de compostos, geralmente aromáticos, presentes em numerosas espécies de plantas (Meyer *et al.*, 1973). Estes compostos químicos naturais servem para fabricar óleos, resinas e outros produtos a partir de plantas; também podem ser importantes para atrair polinizadores ou repelir predadores. Pensa-se que a produção de isopreno também é muito relevante para as plantas, uma vez que contribui para a protecção térmica das mesmas e desta forma previne danos irreversíveis nas folhas provocados por altas temperaturas (Nowak, 2001).

As emissões de compostos orgânicos pelas árvores podem contribuir para a formação de ozono e monóxido de carbono. No entanto, em atmosferas com baixas concentrações de óxidos de azoto os COVs podem mesmo remover o ozono. Como as emissões de COV estão dependentes da temperatura e tendo em conta que as árvores geralmente baixam a temperatura do ar, o aumento do número de árvores pode diminuir as emissões de COVs e, conseqüentemente, os níveis de ozono nas zonas urbanas (Nowak, 2000).

As emissões de COVs variam conforme a espécie de árvore. De acordo com Nowak, (2000) os géneros que emitem mais isopreno e monoterpeno, são: *Casuarina sp*, *Eucalyptus sp*, *Liquidamber sp*, *Nyssa sp*, *Platanus sp*, *Populus sp*, *Quercus sp*, *Robinia*

sp e *Salix sp*. Porém, devido ao grau de incerteza dos modelos atmosféricos, os resultados são ainda inconclusivos em relação a contribuição de cada um destes géneros para o aumento do ozono nas cidades.

Num estudo realizado em conjunto pela Universidade de Lancaster e o Centro de Ecologia e Hidrologia de Edinburgh, foi desenvolvido um Índice de Qualidade do Ar para Árvores Urbanas (UTAQs), utilizando o West Midlands, como uma região tipicamente urbana na Grã-Bretanha. Para o caso de estudo foram analisadas aleatoriamente 32000 árvores escolhidas no West Midlands, em 1999, registando a idade da árvore, a altura, a condição e o diâmetro do tronco. Depois efectuaram-se cálculos de área foliar, estimaram-se emissões potenciais, e calculou-se o valor de carbono armazenado por cada árvore. Os resultados indicam que as árvores que não emitem compostos orgânicos voláteis (COV) e que têm grandes áreas de superfície foliar são a que têm melhor efeito na qualidade do ar. O *Pinus sylvestris*, o *Alnus glutinosa*, o *Acer platanoides*, o *Acer sp*, o *Larix spp*, o *Scots pine* e a *Betula pendula* removem a maior parte dos poluentes, sem contribuírem para a formação de novos poluentes. O *Quercus sp*, o *Populus sp* e *Salix sp* são espécies que podem ter efeitos negativos sobre a qualidade do ar, por isso devem ser tomadas medidas para evitar a plantação dessas espécies em grande número. Mas a plantação em grande escala de quase todas as espécies de árvores teria um efeito positivo sobre a qualidade do ar. Este estudo conclui também que as árvores plantadas na periferia das florestas removem mais eficazmente os poluentes atmosféricos do que as que se encontram no centro da floresta e que com a duplicação do número de árvores no West Midlands a concentração de partículas poderia ser reduzida em 25%, levando o que poderia levar a uma redução de 140 mortes, causadas por partículas no ar, por ano no West Midlands (Stewart *et al.*, 2003).

Em Portugal, mais concretamente na Universidade de Aveiro, já se realizaram alguns estudos sobre o efeito da vegetação urbana na dispersão de poluentes e na qualidade do ar. No estudo de Santos *et al.* (2005) sobre o efeito da vegetação na dispersão de poluentes em zonas urbanas concluem-se que este efeito depende das condições meteorológicas, bem como das características arquitectónicas da área em estudo, não sendo possível generalizar o comportamento observado. Constataram no entanto, que a presença de vegetação pode promover a dispersão através do aumento da velocidade do vento e actuando como barreira, de maior ou menor porosidade, ao transporte de poluentes atmosféricos para zonas sensíveis. Verificaram ainda que quando a direcção do vento está orientada de acordo com as fontes de emissão, a existência de vegetação permite uma melhor dispersão de poluentes gerados pelo

tráfego, favorecendo a qualidade do ar no local. Todavia, se a velocidade ou direcção do vento variarem, os resultados são diferentes, podendo desenvolver-se áreas de recirculação, que acentuam o nível de degradação da qualidade do ar.

Rodrigues (2009), conclui que a qualidade do ar local está fortemente dependente das condições meteorológicas, do tipo e configuração do *street canyon*, da intensidade de tráfego e da presença de vegetação. As simulações mostraram uma clara perturbação exercida pelas árvores no escoamento em *street canyon* e consequente impacte na dispersão. Em geral, a vegetação atenua a velocidade do vento promovendo a dispersão dos poluentes. No entanto, para determinados pontos do domínio de cálculo verifica-se que há um aumento da velocidade do vento provocado pelas árvores. Este aumento da velocidade do vento conduz à formação de áreas de recirculação, dificultando a dispersão dos poluentes emitidos, contribuindo para a formação de *hot-spots*.

3 Modelação da qualidade do ar em zonas urbanas com vegetação

A avaliação da qualidade do ar recorrendo a meios computacionais é cada vez mais uma realidade. Os modelos numéricos vocacionados para a simulação do escoamento e dispersão de espécies químicas na atmosfera constituem uma componente essencial na elaboração e execução de planos estratégicos de gestão integrada da qualidade do ar e na adopção de medidas eficazes de controlo da poluição atmosférica, em particular em zonas urbanas (Amorim, 2003).

No decurso da última década, o expressivo aumento da capacidade e desempenho das plataformas de cálculo (*hardware*), constituiu um forte estímulo à optimização dos códigos numéricos de modelação da dinâmica de fluidos. Actualmente, o recurso a modelos CFD – Computação da Dinâmica de Fluidos - na avaliação das concentrações de poluentes no ar ambiente criou as condições necessárias à obtenção de resultados de elevada fiabilidade, sob as mais diversas condições de entrada. As áreas citadinas, em especial, destacam-se como um dos maiores desafios às capacidades actuais de modelação numérica, devido à complexidade das estruturas tridimensionais existentes (Amorim, 2003).

Os estudos mais recentes com recurso a ferramentas CFD avaliam o papel de parâmetros que afectam o escoamento e a dispersão, como a geometria dos edifícios, densidade da construção, dimensões e características das ruas, meteorologia, circulação dos veículos. Todavia, até à data, o trabalho tem sido limitado à verificação e avaliação do desempenho dos modelos para simulações em contexto investigação na área da poluição atmosférica, faltando um padrão normalizado para aplicações práticas

(Rodrigues, 2009).

Também as árvores surgem como elementos urbanos de características complexas e de difícil simulação. A importância de as incluir nos estudos numéricos de escoamento e dispersão deve-se à sua abundância nas cidades e à sua influência na distribuição espacial de campos de ventos, concentração de poluentes atmosféricos e temperatura no interior das cidades (Rodrigues, 2009).

3.1 O efeito da vegetação

A vegetação tem um papel fundamental no que se refere à alteração do perfil do vento e à sua atenuação (Lalic e Mihailovic, 2004). Perto da superfície das plantas, a velocidade do vento é usualmente inferior a 1 m s^{-1} , apresentando uma redução da sua intensidade na aproximação à zona frontal da planta, aumentando de velocidade nas laterais e acalmando entre e após a vegetação, formando uma zona de esteira. Estes escoamentos são de grande interesse prático, pois permitem determinar a resistência aerodinâmica da vegetação para as transferências de calor e massa, sendo contudo difíceis de quantificar (Larcher, 1995). Deste modo, a vegetação oferece uma resistência ao escoamento atmosférico, que neste caso específico se denomina por canópia das plantas (Seinfeld e Pandis, 1998).

Na Figura 3.1 é apresentado o perfil de velocidade do vento típico numa zona adjacente à vegetação.

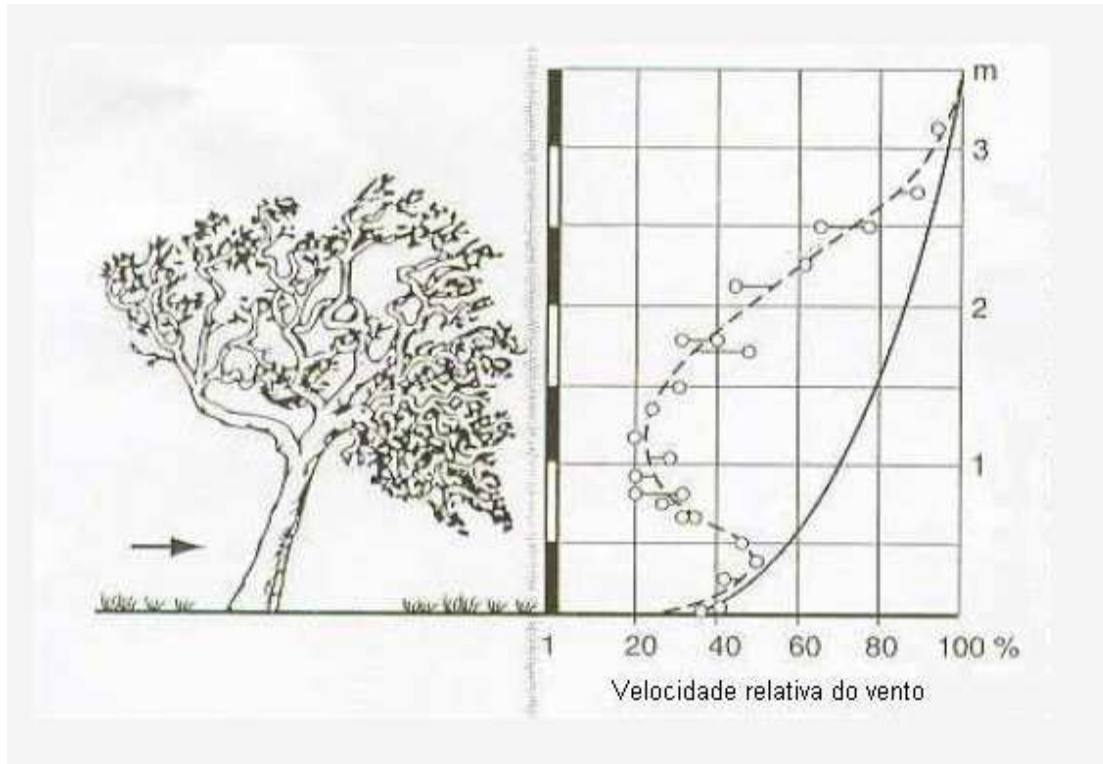


Figura 3.1 - Distribuição do vento em redor da vegetação numa savana. A linha a cheio representa o perfil de velocidade do vento numa zona não perturbada, enquanto que a linha a tracejado é o perfil de velocidade do vento após a vegetação (Vareschi, 1960).

A influência do topo da vegetação é vista como uma importante fonte de turbulência no coberto vegetal. Este desempenha um papel fundamental na transferência da quantidade de movimento entre a vegetação e a atmosfera (Brunet *et al.*, 2000). Acima do coberto, a maior parte dos movimentos ocorre em turbilhões que podem ir de alguns milímetros até várias ordens de grandeza. A vegetação encontra-se parametrizada em muitos modelos climatológicos e meteorológicos, de várias escalas, devido ao efeito exercido por esta sobre o escoamento atmosférico (Lalic *et al.*, 2004).

Neste estudo, tal como referido anteriormente, pretende-se caracterizar e avaliar o efeito da vegetação sobre a dispersão de poluentes atmosféricos em zonas urbanas e consequentemente a sua influência na qualidade do ar, através da aplicação de um modelo CFD que simula o escoamento atmosférico e a dispersão de poluentes.

3.2 O modelo Envi-met

Foi feita uma pesquisa de modelos CFD que poderiam ser usados no presente estudo, tendo em conta os seus objectivos. Dos modelos analisados verificou-se que o

Envi-met, o Panache e o CFD Urban tinham em conta a influência directa da vegetação e a simulação de condições em *street canyon*, enquanto que o Fluent não considerava a influência directa da vegetação, tendo sido excluído. A vantagem do Envi-met em relação aos outros dois modelos consiste na sua disponibilidade, fácil e gratuita.

Dadas as suas características e capacidades, o Envi-met tem tido uma crescente aplicação como ferramenta CFD, ao nível da climatologia Urbana, Arquitectura, Design de Construção ou Planeamento Ambiental (estudos de qualidade do ar), tendo sido utilizado em estudos climatológicos em diversos locais, como por exemplo Sydney e Melbourne (Bruse, 1999; Bruse e Skinner 1999).

3.2.1 Descrição numérica do modelo Envi-met

O Envi-met é um modelo não-hidrostático, que assume o escoamento como incompressível e se baseia na aproximação de Boussinesq. As equações usadas na simulação do escoamento são:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} = -\frac{\partial p'}{\partial x} + K_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) + f(v - v_g) - S_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} = -\frac{\partial p'}{\partial y} + K_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} \right) - f(u - u_g) - S_v$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u_i \frac{\partial w}{\partial x_i} = -\frac{\partial p'}{\partial z} + K_m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_w$$

onde $u_i = (u, v, w)$, $x_i = (x, y, z)$ para $i = 1, 2, 3$, f é o parâmetro de Coriolis ($f=10^{-4} \text{ s}^{-1}$), p' é a perturbação local da pressão e θ é a temperatura potencial ao nível z . Os termos S_u , S_v , S_w descrevem a atenuação da velocidade do vento, devido às forças de arrasto exercidas pela vegetação. Este efeito é parametrizado através de:

$$S_{u(i)} = \frac{\partial p'}{\partial x_i} = c_{d,f} LAD(z) W u_i$$

onde $W = (u^2 + v^2 + w^2)^{0.5}$ é a velocidade média do vento à altura z e LAD é a densidade de área foliar [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$] da vegetação para a mesma altura z . O coeficiente de

arrasto é definido como 0,2 (Bruse, 2008).

É também utilizada a equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Quanto à turbulência, o Envi-met inclui dois modelos: o modelo do comprimento de mistura (modelo de fecho de 1ª ordem), e o modelo E-ε (modelo de fecho de ordem e meia). Os modelos de turbulência recorrem à aproximação de Boussinesq e introduzem mais duas equações de transporte, em que E é a produção de energia cinética turbulenta e ε a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta. Esta equação tem a forma de:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = K_E \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_i^2} \right) + \text{Pr} - \text{Th} + Q_E - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = K_E \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_i^2} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{E} \text{Pr} - c_3 \frac{\varepsilon}{E} \text{Th} - c_2 \frac{\varepsilon^2}{E} + Q_\varepsilon$$

em que Pr é a turbulência de origem mecânica e Th a turbulência de origem térmica. Assim a influência da energia cinética turbulenta de origem mecânica é descrita por:

$$\text{Pr} = K_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

e a de origem térmica por:

$$\text{Th} = \frac{g}{\theta_{ref}(z)} K_h \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

Os valores dos coeficientes turbulentos $c_1=1,44$, $c_2=1,92$ e $c_3=1,44$ são os obtidos por Launder e Spalding (Launder *et al*, 1974).

É igualmente importante calcular a turbulência causada pela vegetação. As fórmulas que descrevem os Q_E e Q_ε são:

$$Q_E = c_{d,f} LAD(z) \cdot W^3 - 4c_{d,f} LAD(z) \cdot |W| \cdot E$$

$$Q_\varepsilon = 1,5c_{d,f} LAD(z) \cdot W^3 - 6c_{d,f} LAD(z) \cdot |W| \cdot \varepsilon$$

As equações diferenciais presentes no modelo são resolvidas pelo método das diferenças finitas.

3.2.2 Parametrização da vegetação

Uma análise possível do coberto vegetal baseia-se na utilização do índice de área foliar (LAI – *Leaf Area Index*). Esta quantidade indica a área foliar total de folhas num determinado plano. O LAI e o LAD encontram-se relacionados por:

$$LAI = \int_0^h LAD(z) dz$$

Quando $z \rightarrow 0$ ou $z \rightarrow h$: $LAD(z) \rightarrow 0$

$z \rightarrow z_m$: $LAD(z) \rightarrow LAD_m$

Esta fórmula empírica, obtida por Lalic e Mihailovic (2004), necessita de três parâmetros: altura da árvore, h ; o valor máximo de densidade foliar, LAD_m ; e a correspondente altura, z_m . A fórmula pode ser aplicada a uma vasta gama de árvores, segundo a classificação de Kolic (1978):

1. $z_m = 0,2h$ (carvalho)
2. $0,2h < z_m < 0,4h$ (plátanos)
3. $0,4h$ (pinheiro).

A função para o cálculo de $LAD(z)$ é

$$LAD(z) = LAD_m \left(\frac{h - z_m}{h - z} \right)^n \exp \left[n \left(1 - \frac{h - z_m}{h - z} \right) \right]$$

Onde

$$n = \begin{cases} 6 \rightarrow 0 \leq z < z_m \\ \frac{1}{2} \rightarrow z_m \leq z \leq h \end{cases}$$

Esta função é definida por ramos, sendo representada, até z_m , por uma função linear e de z_m até h por uma função hiperbólica.

O valor de LAD_m pode ser obtido através de um calendário fenológico florestal ou através do valor de LAI. Para calcular o LAD_m recorrendo ao LAI utiliza-se a seguinte equação

$$LAI = \int_0^h LAD(z) dz$$

Assim,

$$LAI = \int_b^t LAD_m \left(\frac{h - zm}{h - z} \right)^n \exp \left[n \left(1 - \frac{h - zm}{h - z} \right) \right] \partial z$$

Como LAD_m é constante, pode fazer-se:

$$LAD_m = \frac{LAI}{\int_b^t \left(\frac{h - zm}{h - z} \right)^n \exp \left[n \left(1 - \frac{h - zm}{h - z} \right) \right] \partial z}$$

3.2.3 Condições fronteira e dados de entrada

Para a resolução das equações base, o Envi-met pode considerar três tipos de condições fronteira:

- Abertas: Os valores das células adjacentes à fronteira são copiados para esta, em cada intervalo de tempo. Este é o tipo de condições fronteira recomendadas no manual do Envi-met (Bruse, 2008); contudo, devido à utilização dos valores das células adjacentes, existe a possibilidade de instabilidade numérica.
- Forçadas: Existe um modelo unidimensional que gera valores do perfil das condições fronteira, durante o período de simulação; esta é a forma que garante maior estabilidade numérica; existe, porém o risco dos dados gerados pelo modelo unidimensional não serem representativos das condições de estudo, constituindo assim uma fonte de erro.
- Cíclicas: Os valores simulados na fronteira a jusante do escoamento são copiados para a fronteira a montante. Neste tipo de condições fronteira existe o risco de *feedback* não desejado no modelo, podendo causar instabilidade numérica.

Na Figura 3.2 representa-se o fluxo de dados do Envi-met 3.1

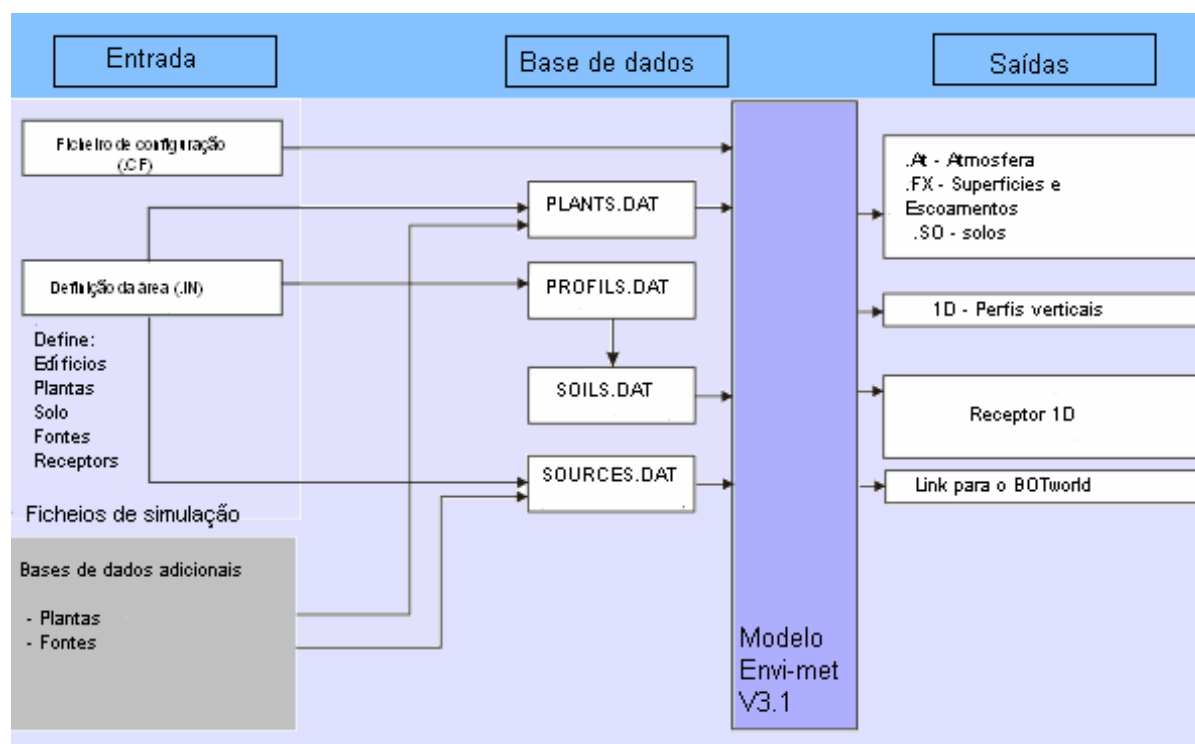


Figura 3.2 - Fluxo de dados do Envi-met 3.1 (Bruse, 2008).

Os dados de entrada necessários para a simulação são a definição da área (posição e altura dos edifícios, localização dos diferentes tipos de vegetação, fontes de emissão e cobertura do solo), dados meteorológicos, e condições fronteira. Os resultados obtidos fornecem a informação sobre o comportamento da atmosfera, perfis verticais de temperatura e velocidade do vento, dados biometeorológicos (Bruse, 2008).

4 O Caso de estudo

Para o caso de estudo foi seleccionada a cidade de Bragança, uma vez que este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto Greenurbe – Os impactes dos Espaços Verdes na Qualidade do Ambiente Urbano, que tem como principal objectivo avaliar os efeitos dos Espaços Verdes sobre vários aspectos da qualidade do ambiente urbano (qualidade do ar, ruído e condições microclimáticas) e do bem-estar social, num contexto espacial particular - a cidade de Bragança. A opção pela cidade de Bragança foi importante, devido a inexistência de uma estação de qualidade do ar na região, podendo este estudo contribuir para o conhecimento de níveis de concentração de PM_{10} na cidade.

4.1 Caracterização da cidade de Bragança

A cidade de Bragança é a capital do Distrito de Bragança, Região Norte e subregião do Alto Trás-os-Montes, com 20 309 habitantes na cidade. É sede de um dos municípios portugueses com maior área, 1 173,93 km² e 34 375 habitantes em 2008 (INE). O município é limitado a Norte e Leste por Espanha, a Sueste pelo município de Vimioso, a Sudoeste por Macedo de Cavaleiros e a oeste por Vinhais, sendo a cidade de Portugal Continental mais setentrional, como se pode ver na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Mapa do distrito de Bragança (URL1).

Bragança pertence à região denominada de Terra Fria Transmontana. Para fins estatísticos integra-se na NUT III do Alto Trás-os-Montes, da qual fazem parte mais treze Concelhos. A localização no extremo mais nordeste do país faz com que Bragança tenha tido ao longo dos anos uma dupla posição geográfica periférica, a nível nacional e a nível regional. Esta perifericidade foi atenuada pelo facto de ser capital de Distrito e sede de Concelho, o que conduziu a uma polarização sobre a sua envolvente externa como centro político, administrativo e populacional, encontrando-se em Bragança a sede de algumas entidades e associações de cariz regional e delegações e direcções regionais da Administração Central (URL2).

Bragança tem um clima temperado, com influências tanto continentais como

atlânticas. O Verão é tipicamente quente e seco e os dias costumam ser solarengos; durante as ondas de calor a temperatura pode chegar perto dos 40°C. No decorrer deste período a precipitação é escassa e a maior parte da que cai deve-se a trovoadas de fim de tarde. O Inverno é longo, frio e húmido, é nesta estação que se encontram os meses mais chuvosos. Apesar disso, longos períodos com dias de sol não são incomuns (Gonçalves, 1985).

A autarquia de Bragança considera o ambiente urbano, a conservação e gestão do património natural e paisagístico, factores fundamentais na estratégia de desenvolvimento sustentável concelhio. A importância dos espaços verdes no meio urbano como elementos essenciais na qualidade de vida, levou o Município a apostar decisivamente no incremento de espaços verdes, passando de uma área de 28653 m² em 1998, para 241510 m² em 2008, valor que permite proporcionar 10,6 m²/hab de espaço verde. Este valor está acima do preconizado pela Organização Mundial de Saúde e próximo do valor definido pela Direcção-Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano (URL2).

O centro da cidade é caracterizado pela existência de uma Praça com jardins e árvores de grande porte, tílias, e com duas avenidas, a Avenida Sá Carneiro que é uma das entradas da cidade e que por isso que tem um grande volume de tráfego e outra mais central, a Avenida João da Cruz, que principia na estação e termina junto à Praça Cavaleiro Ferreira. Esta avenida é caracterizada por um separador central constituído por jardins e cerejeiras e de cada lado da avenida encontram-se tílias, cerejeiras e *Liquidambers*. Esta avenida e a praça são caracterizadas por algum tráfego, deslocando-se os automóveis a uma baixa velocidade.

Na Figura 4.2, retirada do Inventário das Emissões de Poluentes da Região Norte, realizado pelo Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e pela CCDR-N, encontra-se a distribuição espacial das emissões de PM₁₀ na região Norte, destacando-se a cidade de Bragança.

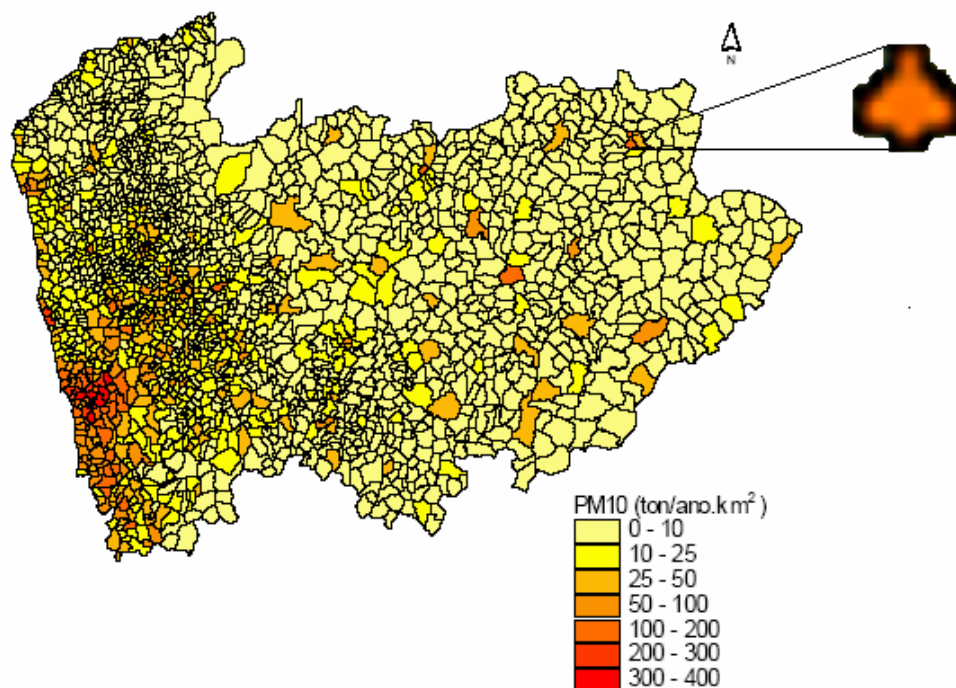


Figura 4.2 - Distribuição espacial das emissões de PM₁₀ na Região Norte (CCDR-N)

Analisando a Figura 4.2 consegue-se perceber que os valores das emissões de PM₁₀ encontram-se entre as 100 e as 200 ton/ano.km² de PM₁₀.

4.2 Campanha de medição

No âmbito deste trabalho foi realizada uma campanha de medição de dados meteorológicos e de concentração de PM₁₀ e Ozono, com o objectivo de caracterizar a qualidade do ar da cidade de Bragança, uma vez que não existe nenhuma estação de qualidade do ar na cidade. Esta campanha decorreu nos dias 8 e 9 de Julho de 2009 na área representada na Figura 4.3.

Esta campanha é também importante, porque para a aplicação do modelo Envi-met são necessários dados meteorológicos, dados de emissões do tráfego automóvel, dados sobre a vegetação e dados de qualidade do ar (para posterior validação do modelo).



Figura 4.3 - Área de estudo da cidade de Bragança

Durante a campanha de medição, e com o intuito de calcular os valores de LAD, efectuaram-se também medições do LAI de cada espécie de árvore existente na área. Essas medições foram feitas com um Ceptómetro AccuPar LP 80, ilustrado na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Equipamento de medição do Índice de Área Foliar (LAI) – Ceptómetro AccuPAR LP-80.

O ceptómetro AccuPAR LP-80 incorpora 80 sensores sensíveis à radiação PAR. O microcontrolador interpreta os sinais de cada sensor e dá o valor médio do segmento especificado. Também calcula instantaneamente o LAI nominal de cada medição efectuada, com base na relação (PAR_z/PAR_0) e no coeficiente de extinção.

Na Tabela 4.1 encontram-se os valores de LAI medidos, para as principais árvores existentes no centro da cidade de Bragança.

Tabela 4.1 - Valores de LAI medidos para as espécies florestais dominantes na área de estudo

	Tílias	Cerejeiras	<i>Liquidamber</i>
LAI ($m^2 \cdot m^{-2}$)	6,15	4,17	5,44

Analisando a Tabela 4.1 verifica-se que as Tílias são as árvores que têm maior índice de área foliar e as cerejeiras o menor.

Para calcular as emissões do tráfego automóvel, foram efectuadas contagens de tráfego na cidade de Bragança nos 10 locais assinalados na Figura 4.3, durante os dias 8

e 9 de Julho, por períodos de 10 e 15 minutos, ao longo dos dois dias. Procurou-se obter dados, para cada local, em períodos de maior e menor tráfego, para ser possível estimar as horas para as quais não havia contagens. Essa estimativa foi efectuada com base na análise de todos os dados obtidos. Nestas contagens de tráfego, as categorias consideradas foram: automóveis ligeiros a gasóleo, automóveis ligeiros a gasolina, ligeiros de mercadorias, pesados de mercadorias, pesados de passageiros e motociclos.

Durante a campanha foi possível medir parâmetros meteorológicos, nomeadamente a temperatura, humidade relativa, insolação, velocidade e direcção do vento, recorrendo a uma estação meteorológica móvel, que se pode observar na Figura 4.5 pertencente ao Instituto Politécnico de Bragança. No dia 8, a estação efectuou medições nos 10 locais assinalados na Figura 4.3 e no dia 9 permaneceu na Praça Cavaleiro Ferreira, assinalado na Figura 4.3 como o local 8, das 7:00 as 12:00 e das 14:00 as 18:30m. Estas medições foram efectuadas a uma altura de 2 metros.



Figura 4.5 – Medição de parâmetros meteorológicos e de PM_{10} na área de estudo.

Nas figuras 4.6 e 4.7, respectivamente, apresenta-se a variação horária da temperatura e humidade relativa ao longo do dia 9 de Julho.

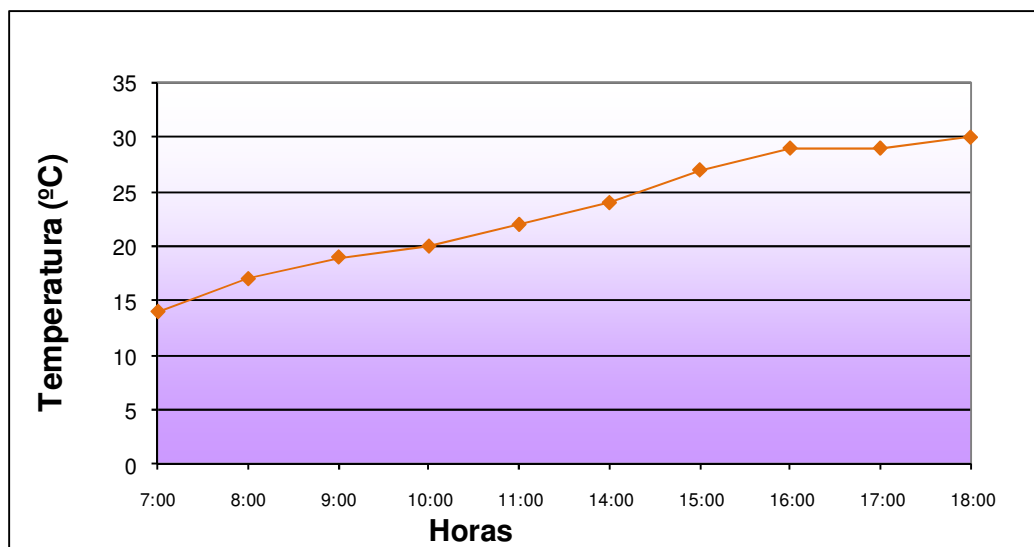


Figura 4.6 - Valores médios horários da temperatura ao longo do dia

Como se pode verificar apesar de o dia ter começado frio, com cerca de 14 °C, a temperatura foi aumentando e chegou a atingir os 30°C.

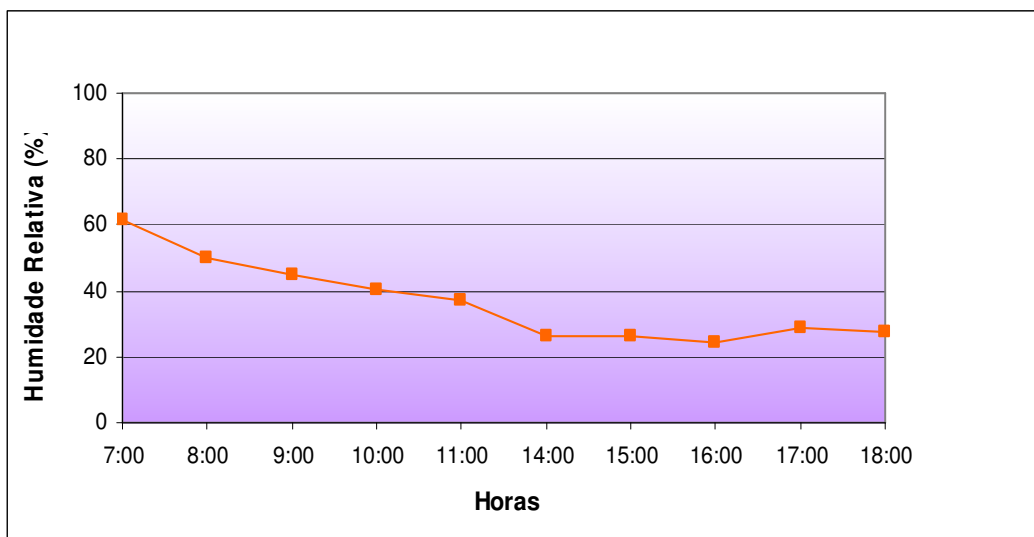


Figura 4.7 - Valores médios horários da humidade relativa ao longo do dia

O dia começou com valores de humidade a rondar os 61%, atingindo o valor mais baixo cerca das 16h.

Na Figura 4.8 apresenta-se a variação da velocidade do vento ao longo do dia 9 de Julho, medida a uma altura de 2 m. Verifica-se que as velocidades variam entre os $0,64 \text{ m.s}^{-1}$ às 7:00 e as $1,17 \text{ m.s}^{-1}$ às 14h, que são velocidades extremamente baixas.

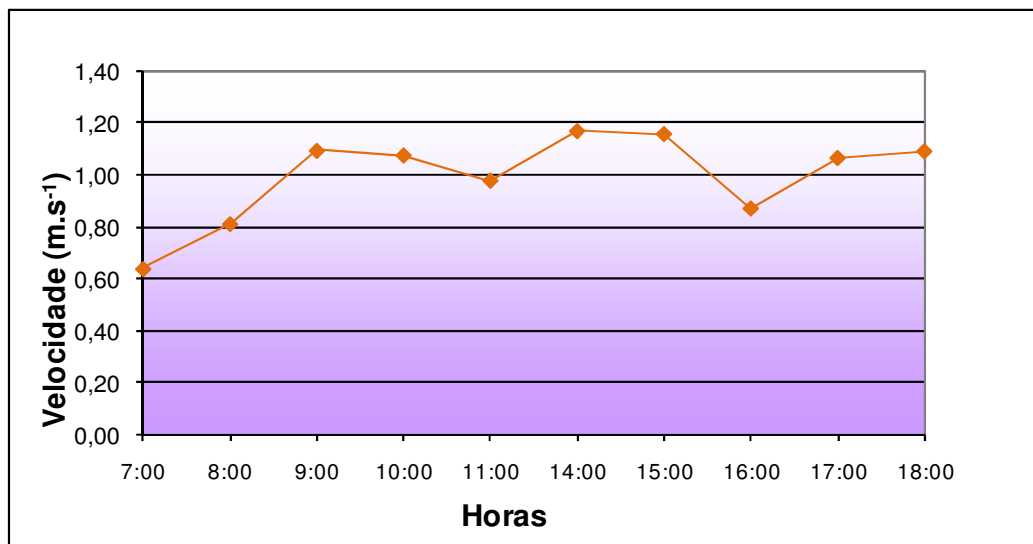


Figura 4.8 - Valores médios da velocidade do vento ao longo do dia

Na Figura 4.9 apresenta-se a variação da direcção do vento ao longo do dia. A direcção mantém-se constante, geralmente de Sudoeste, apresentando-se às 7h de Norte. Saliente-se, no entanto a dificuldade em analisar valores de velocidade do vento associados a direcções do vento tão baixas.

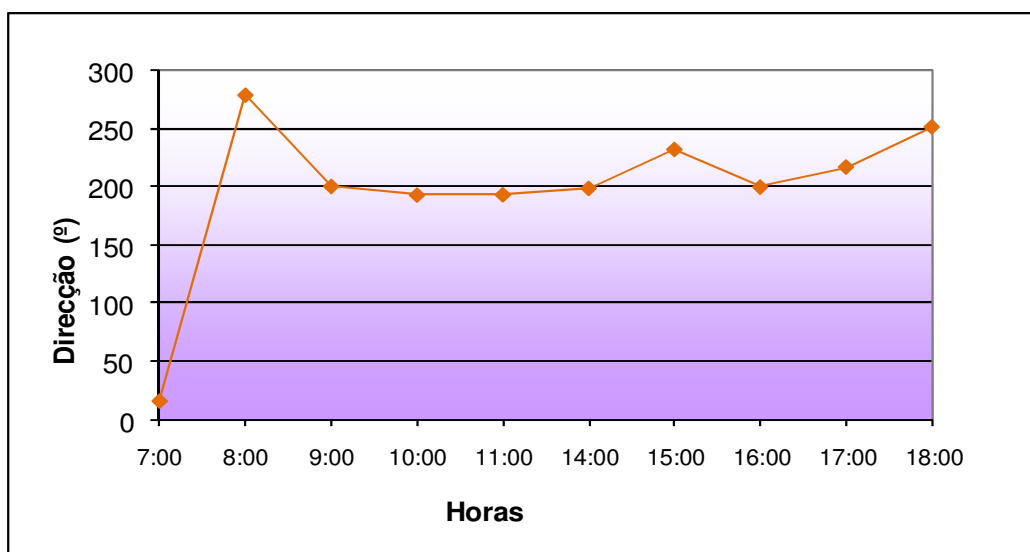


Figura 4.9 - Valores médios de direcção do vento ao longo do dia

Em simultâneo com os valores meteorológicos mediram-se as concentrações de PM_{10} com um aparelho ADR-1200S, cuja fotografia se apresenta na Figura 4.10. É um sistema concebido para a monitorização em contínuo de material particulado em suspensão na atmosfera. O aparelho possui uma estrutura fechada, resistente às intempéries, o que permite operações seguras e efectivas sob várias condições ambientais.



Figura 4.10 - Monitor ADR-1200s.

O ADR-1200s transmite em tempo real para um *datalogger* interno. Foi programado para registar valores de concentração de minuto a minuto, mediante um princípio de operação óptico, mais precisamente por meio de dispersão de radiação. As partículas penetram no equipamento e geram sinais a diferentes comprimentos de onda, em função do seu diâmetro, que são registados pelo detector.

A Figura 4.11 apresenta as concentrações de PM_{10} medidas durante o dia 9 de Julho.

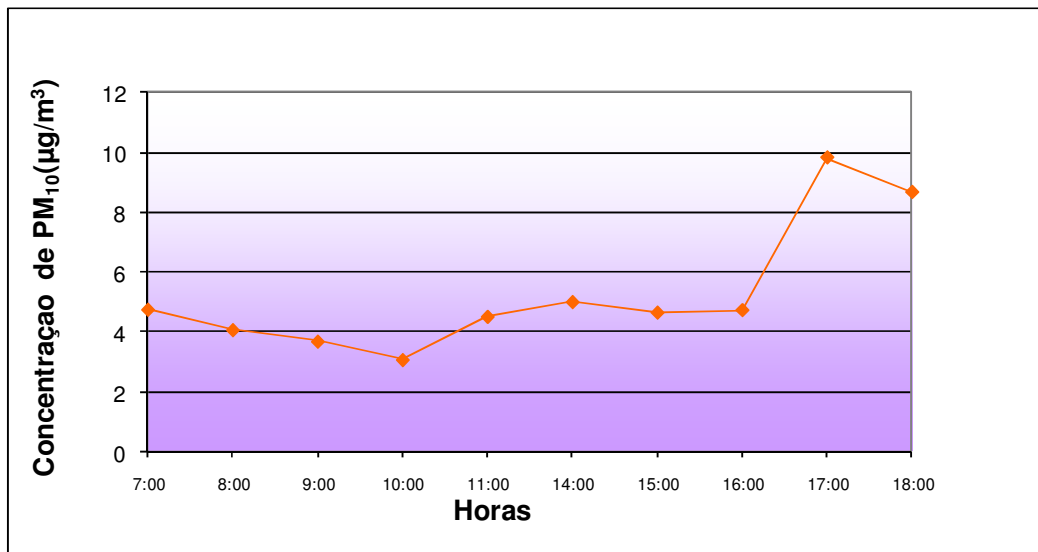


Figura 4.11 - Valores da concentração de PM₁₀ ao longo do dia

As concentrações mantêm-se mais ou menos constantes das 7h até às 16h, variando entre os 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e os 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Às 17 horas atinge-se o valor mais alto, de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, não se tendo observado no local nenhuma outra fonte de poluição para além do tráfego, que pudesse fazer aumentar tão significativamente as concentrações de PM₁₀. Esse aumento pode ser devido ao facto de durante a tarde a estação de medição se encontrar mais próxima da via rodoviária e sofrer por isso uma influência mais directa do tráfego. De referir que estes valores de concentração de PM₁₀ são muito baixos, quando comparados com outras cidades de Portugal. Aveiro, por exemplo registou o valor máximo horário de concentração de 141 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ na estação de Ílhavo e valores de médias horárias anuais a rondar os 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, muito acima do que foi registado em Bragança.

No dia 8 de Julho realizaram-se medições de PM₁₀ em 10 pontos da cidade, para se tentar compreender a distribuição das concentrações de PM₁₀ na zona centro da cidade de Bragança. O resultado dessas medições encontra-se na Figura 4.12, e as horas a que foram realizadas apresentam-se na Tabela 4.2.



Figura 4.12 - Distribuição espacial das concentrações de PM_{10} na cidade de Bragança.

Tabela 4.2 – Horas das medições

ponto	horas
1	9:36 - 9:54
2	10:21 - 10:38
3	10:02 - 10:17
4	10:46 - 11:03
5	11:08 - 11:23
6	11:32 - 11:48
7	11:53 - 12:08
8	11:28 - 11:45
9	13:59 - 14:13
10	14:30 - 14:46

Através da análise da Figura 4.12 verifica-se que o local que apresenta concentrações mais elevadas é o ponto 6, 3 e 2. De realçar que as concentrações elevadas do ponto 6 podem dever-se ao aproximar da hora de almoço. O ponto 3 fica situado na Avenida Sá Carneiro que é uma das entradas da cidade, logo com um grande fluxo de tráfego.

5 Aplicação do Envi-met

A aplicação do Envi-met requer a definição prévia do domínio da simulação, bem como a compilação e tratamento dos dados de entrada necessários. Apresentam-se também neste capítulo os resultados do Envi-met que simulou as condições associadas ao dia 9 de Julho, mas também um cenário em que se considerou a ausência de vegetação na área de estudo.

5.1 Domínio de simulação

Na selecção do domínio de simulação procurou-se uma zona com tráfego automóvel, relativamente elevado e com vegetação. Apesar de a escolha poder ter recaído sobre outros domínios espaciais, a zona que integra a Praça Cavaleiro Ferreira foi a seleccionada. Esta Praça tem cerca de 2500 m², estando localizada no núcleo central da cidade, entre a Avenida Sá Carneiro e a Avenida João da Cruz. Encontra-se limitada por edifícios, principalmente a noroeste e a sudeste.

É uma Praça com uma área central calcetada, a imitar calçada portuguesa, com bancos de pedra que se situam por baixo da copa das árvores, o que se torna agradável nos meses quentes de Verão e com uma fonte, como se pode ver na Figura 5.1. A Praça é rodeada por um conjunto de 15 tílias, de grande porte, e diversos canteiros com relva e várias espécies de herbáceas.



Figura 5.1 - Praça Cavaleiro Ferreira

Na Avenida João da Cruz, a separação das faixas de rodagem é efectuada através de um jardim, que se estende ao longo de toda a Avenida, sendo só interrompido em certas zonas para permitir aos veículos mudares de direcção ou inverterem a sua marcha. Esse jardim tem uma zona relvada com várias herbáceas e alguns arbustos. A zona de passeio é novamente a calçada portuguesa e tem cerejeiras a rodear todo esse jardim. De um dos lados da faixa de rodagem encontram-se 9 tílias de grande porte e do outro 8 *Liquidambers*.

Na Figura 5.2 pode ver-se a área escolhida para o domínio de simulação.



Figura 5.2 - Área aproximada do domínio de simulação

O domínio de estudo tem as dimensões de 466 m x 490 m x 25 m. Através de fotografia da área do domínio de estudo, e das observações efectuadas no local, representaram-se com a maior exactidão possível, os prédios, vegetação e tipo de solo. O domínio inclui 294 edifícios, com alturas compreendidas entre os 4 e os 19 metros, com predominância de prédios de 2, 3 e 4 andares. A vegetação, tal como foi referido, é composta por árvores de grande e pequeno porte das espécies tílias, cerejeiras e *Liquidambers*, e relva nos jardins. Em relação ao solo, o domínio é composto por diferentes tipos, nomeadamente o asfalto, o paralelo, o granito em alguns passeios e o quartzo, que faz parte das zonas em que está representada a calçada portuguesa. O local assinalado com a seta laranja representa a Praça Cavaleiro Ferreira, que se situa praticamente no meio do domínio, e onde decorreram as medições que serviram para

obter os dados de entrada para o modelo.

5.2 Condições de aplicação – dados de entrada

Para a aplicação do modelo Envi-met, são necessários dados meteorológicos e dados de emissões de tráfego e para a validação do modelo dados de qualidade do ar.

Consideram-se as condições fronteira abertas para o perfil de vento, para a temperatura e humidade. Para a produção e dissipação de energia cinética turbulenta utilizaram-se condições fronteira forçadas. Estas são as condições recomendadas por Bruse (2008).

5.2.1 Dados meteorológicos

O modelo Envi-met necessita, como dado de entrada, da velocidade a uma altura de 10 m. Tendo em conta que a estação meteorológica efectuou as medições a uma altura de 2 m, foi necessário converter a velocidade medida através do perfil de potência do vento:

$$\frac{\bar{v}_x(z)}{\bar{v}_r} = \left(\frac{Z}{Z_r} \right)^p$$

onde Z_r e v_r são a altura e a velocidade de referência, respectivamente, e p uma potência, que depende da superfície e da estabilidade atmosférica. Na Tabela 5.1 encontram-se as classes de estabilidade escolhidas, de acordo com a classificação de Pasquill-Gifford e as velocidades do vento aos 10 metros.

Tabela 5.1 – Valores de velocidade do vento calculados para uma altura de 10 metros

Horas	Velocidade a 2 m (m.s ⁻¹)	Classes de estabilidade	Velocidade a 10 m (m.s ⁻¹)
7:00	0,64	classe D	1,03
8:00	0,81	classe C	1,23
9:00	1,09	classe C	1,66
10:00	1,08	classe B	1,56
11:00	0,98	classe B	1,42

12:00	1,24	classe A	1,71
13:00	0,93	classe A	1,29
14:00	1,17	classe A	1,61
15:00	1,16	classe A	1,60
16:00	0,87	classe B	1,26
17:00	1,07	classe B	1,54
18:00	1,09	classe C	1,66

5.3 Dados da vegetação

Com os valores de LAI obtidos através de medição foi possível calcular os LAD para as diferentes árvores. Tendo em conta que zm corresponde à altura do valor onde a densidade foliar é máxima, e que de acordo com o observado no local esse valor diferia um pouco do obtido segundo a classificação de Kolic, efectuaram-se algumas aproximações. Na Tabela 5.2 encontram-se os valores de LAI medidos, juntamente com a altura e zm de cada árvore.

Tabela 5.2 - Valores de LAI medidos

	Tílias	Cerejeiras	<i>Liquidamber</i>
Altura (m)	16	6	6
zm (m)	10	4	4
LAI	6,15	4,17	5,44

Na Tabela 5.3 encontram-se os valores de LAD calculados para as diferentes árvores.

Tabela 5.3 - Valores de LAD para as diferentes árvores

	Tílias	Cerejeiras	<i>Liquidamber</i>
LAD 1	0,155	0,199	0,26
LAD 2	0,229	0,306	0,4
LAD 3	0,342	0,477	0,623
LAD 4	0,505	0,748	0,976
LAD 5	0,712	1,147	1,496
LAD 6	0,882	1,609	2,01
LAD 7	0,453	0,83	1,083
LAD 8	0,406	0,77	1,004
LAD 9	0,225	0,473	0,617
LAD 10	0	0	0

Através da análise da Tabela 5.3, verifica-se que, de um modo geral as tílias são as árvores que têm menor densidade de área foliar, enquanto as *Liquidamber* são as que apresentam maior LAD.

5.4 Emissões do tráfego automóvel

As emissões geradas pelo tráfego automóvel no domínio de cálculo considerado foram estimadas pelo modelo TREM [Tchepel *et al.*, 2002], desenvolvido no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. O TREM calcula as emissões com base: na velocidade média de circulação, tipo da rua, declive da rua; e na distribuição dos veículos pelas 96 classes diferentes, que o modelo considera. As viaturas são divididas em tipos, conforme o peso, função e tipo de combustível (p ex: pesado de mercadorias a diesel), subdivididas conforme a tecnologia de redução das emissões e dentro destas subdivisões, separadas em classes de acordo com a dimensão do motor.

Neste modelo, as vias de tráfego são consideradas como fontes em linha, sendo as emissões calculadas individualmente para cada segmento de estrada, caracterizado em termos de frota de veículos, volume de tráfego e velocidade média.

Na Figura 5.3 estão representadas a amarelo as ruas onde se realizaram as

contagens de tráfego, na cidade de Bragança.

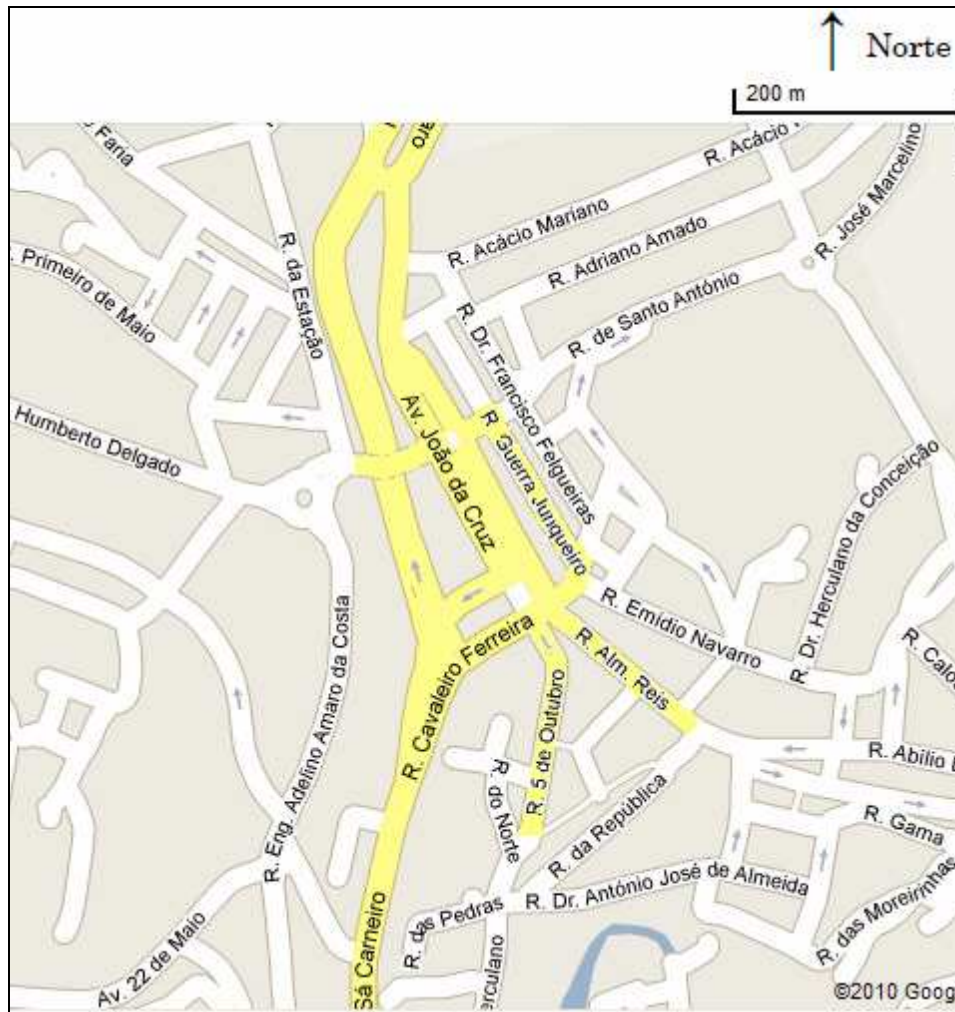


Figura 5.3 - Representação da rede de tráfego do domínio de estudo.

Na Figura 5.4 apresentam-se os caudais mássicos de emissão de PM_{10} , para as várias ruas consideradas no domínio e que foram simuladas como fontes de emissão no modelo Envi-met.

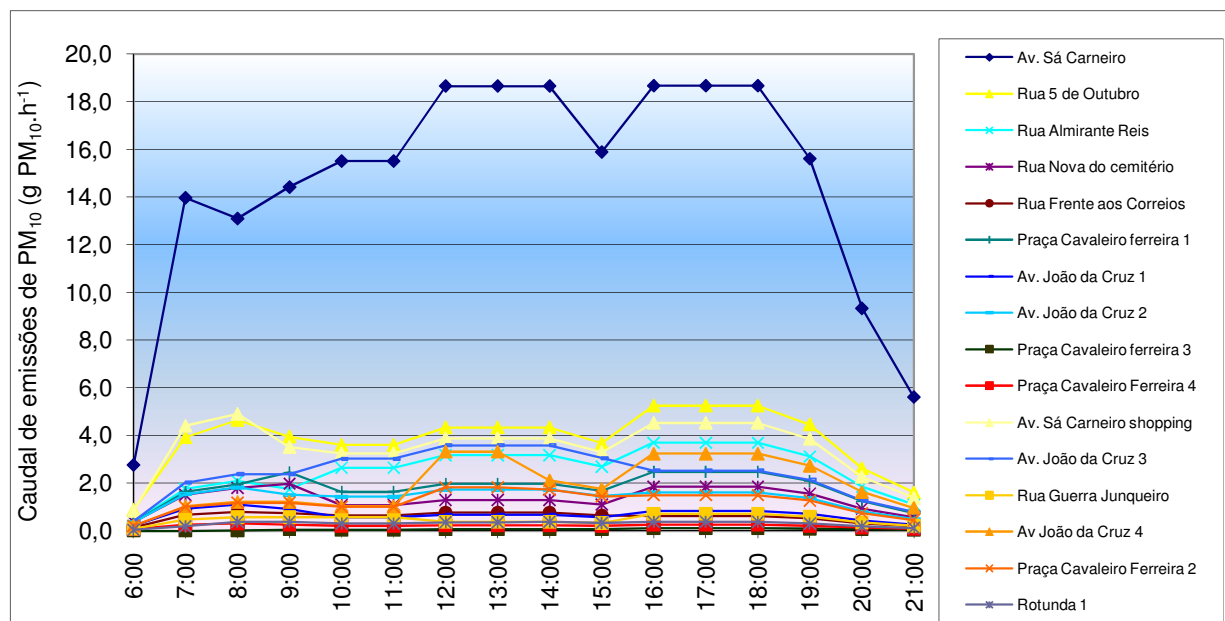


Figura 5.4 - Caudal mássico ($g.h^{-1}$) de emissão de PM_{10} , estimado pelo TREM, para as várias ruas do domínio.

Verifica-se que as vias com maior caudal de emissão são a Avenida Sá Carneiro, Avenida João da Cruz e Rua 5 de Outubro, que ficam próximas da Praça Cavaleiro Ferreira. A Av. Sá Carneiro é uma das entradas na cidade, o que poderá justificar que seja a via com mais tráfego e, consequentemente, com maiores emissões. De salientar que os períodos com maior caudal mássico correspondem aos períodos com maior trânsito, nomeadamente o início da manhã, o período do almoço e o final da tarde.

5.5 Apresentação e análise de resultados

O modelo Envi-met foi aplicado a duas situações: a situação de referência em que se representa a cidade o mais próximo do que ela é, e que vai permitir a validação do modelo, e a segunda em que se retira a vegetação existente da cidade para se tentar perceber o seu contributo na qualidade do ar.

5.5.1 Validação

Para avaliar o desempenho do modelo, realizou-se a comparação dos resultados de concentração de PM_{10} medidos na estação de monitorização, localizada na Praça

Cavaleiro Ferreira e os simulados pelo Envi-met. Na Tabela 5.4 e Figura 5.5 apresenta-se a comparação dos valores de PM_{10} , para o dia 9 de Julho entre as 7h e as 18h, assim como o erro relativo para cada simulação.

Tabela 5.4 - Comparação dos valores de PM_{10} simulados pelo Envi-met e medidos no local de estudo.

Horas	Valores medidos de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valores Simulados de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Erro Relativo (%)
7:00	4.75	1.46	-69.2
8:00	4.07	1.21	-70.2
9:00	3.68	2.88	-21.9
10:00	3.07	2.48	-19.1
11:00	4.51	2.86	-36.5
14:00	5.00	1.86	-62.7
15:00	4.65	2.68	-42.4
16:00	4.73	2.97	-37.2
17:00	9.82	3.81	-61.2
18:00	8.67	1.69	-80.5

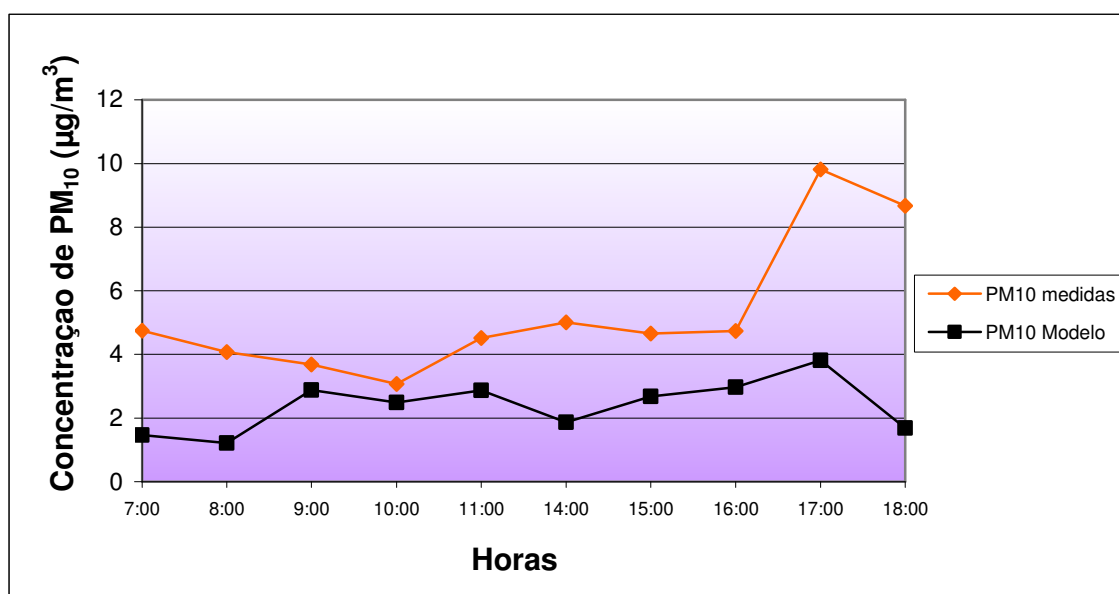


Figura 5.5 - Comparação dos valores de PM_{10} simulados e registados no local de estudo na estação de monitorização, no dia 9 de Julho de 2009.

A análise comparativa dos valores medidos e simulados permite verificar uma tendência semelhante ao longo do dia, à excepção das primeiras e ultimas horas do

período em análise. No início da manhã essa diferença pode dever-se ao facto da direcção do vento ser contrária ao verificado no resto do dia. No geral, existe uma subestimativa dos valores de concentração de PM_{10} pelo Envi-met, que pode resultar do facto do modelo não ter em conta concentrações de background. Com base na tabela 5.4 verifica-se que os resultados do Envi-met apresentam um erro relativo muito elevado, tendo em conta que a Directiva Quadro refere um valor limite de 50% para o erro das medições efectuadas. Isto pode dever-se ao facto de os valores de concentração de PM_{10} serem muito baixos tanto os medidos como os simulados e um pequeno desvio implica um erro muito elevado.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 apresentam-se os campos horizontais, a uma altura de 2 metros, das concentrações de PM_{10} , às 7:30h e às 17:30. Escolheram-se estas horas por terem sido estas em que os valores de concentrações medidos diferiam mais dos simulados.

As coordenadas X e Y têm como unidades o numero de células, tendo cada célula o comprimento de 2 m. O ponto castanho representado nas figuras dos campos de concentração, temperatura e velocidade do vento corresponde ao local onde foram efectuadas as medições de qualidade do ar.

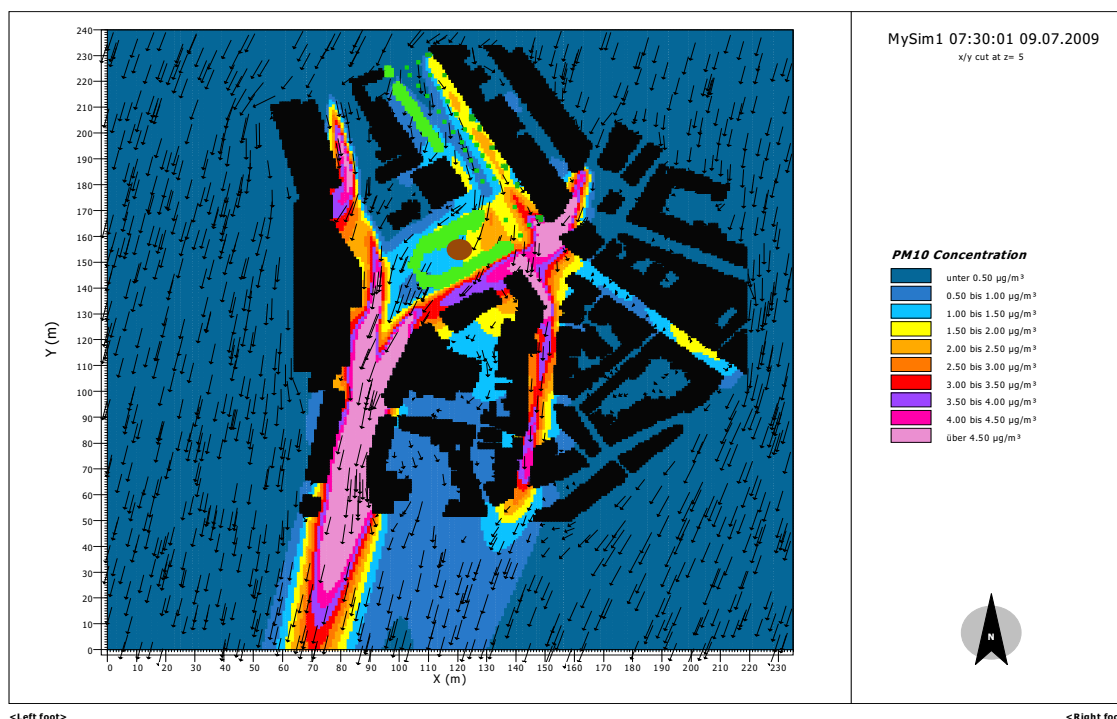


Figura 5.6 - Campo horizontal de concentrações de PM_{10} (altura 2 m) às 7:30 do dia 9 de Julho de

2009.

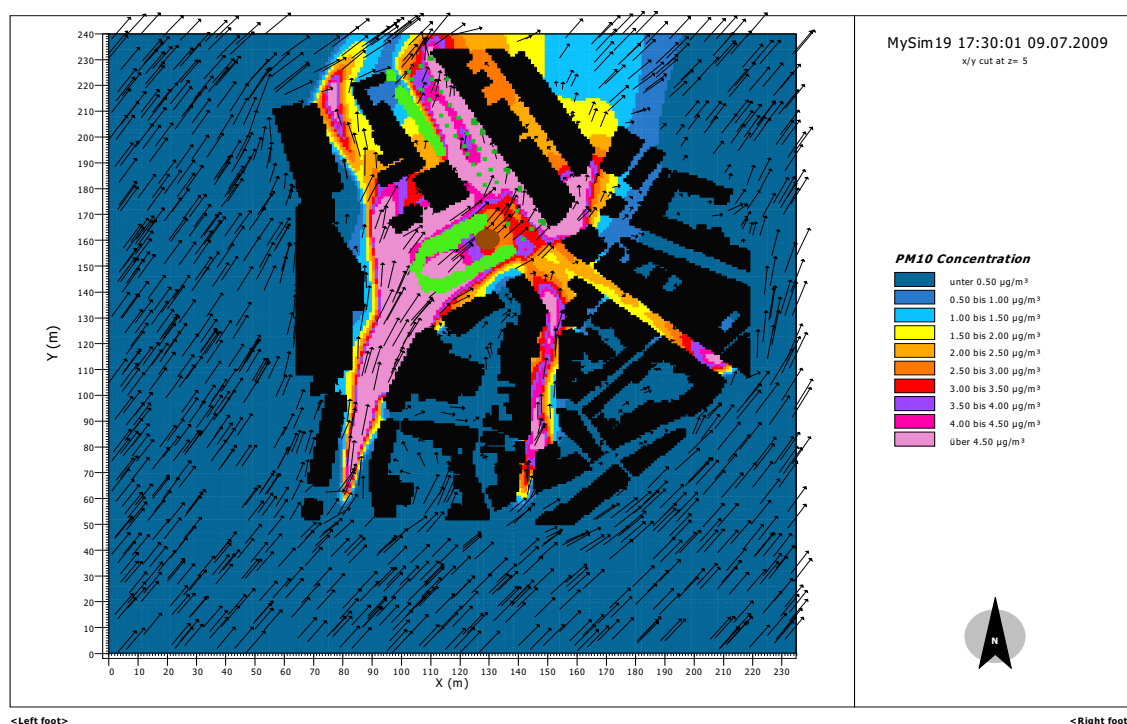


Figura 5.7 - Campo horizontal de concentrações de PM₁₀ (altura 2 m) às 17:30 do dia 9 de Julho.

Da análise das duas figuras verifica-se que apesar da direcção do vento ser completamente diferente, as concentrações mais elevadas se situam na Avenida Sá Carneiro, situação que já era esperada tendo em conta que é nessa avenida que ocorre maior volume de tráfego rodoviário. É interessante verificar que às 7:30 as concentrações mais elevadas acompanham a direcção do vento na direcção da Avenida Sá Carneiro e que por isso o local onde decorreram as medições tenha concentrações mais baixas. Às 17:30 a direcção do vento era de sudoeste, o que provoca uma dispersão dos poluentes da Avenida Sá Carneiro para a Praça Cavaleiro Ferreira, aumentando assim a concentração dos mesmos no local de medição.

Na Figura 5.8 estão representados os campos horizontais, a uma altura de 2 metros, das concentrações de PM₁₀, às 10:30h, por ser a hora onde as concentrações medidas e simuladas estão mais próximas.

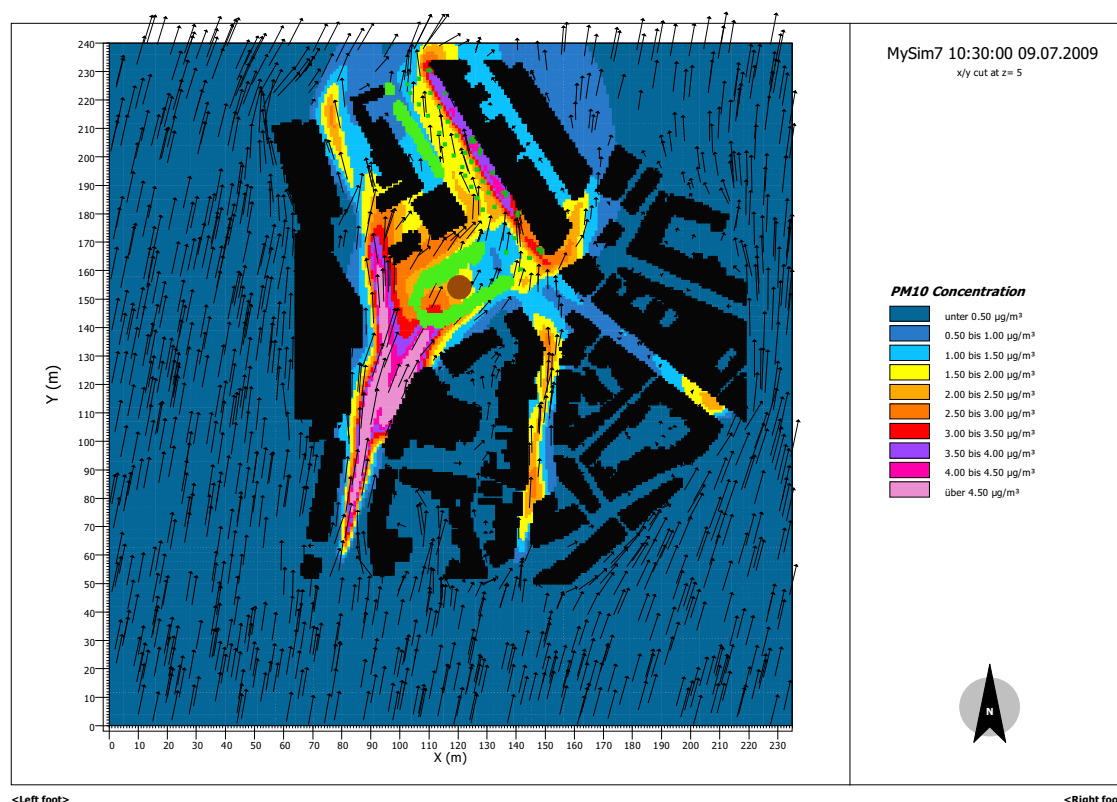


Figura 5.8 - Campo horizontal de concentrações de PM_{10} (altura 2 m) às 10:30 do dia 9 de Julho de 2009.

5.5.2 O efeito da vegetação

Com o objectivo de compreender melhor o efeito da vegetação na Qualidade do Ar na cidade, realizaram-se simulações, idênticas às descritas, mas sem a inclusão de qualquer tipo de vegetação. Para além da análise dos campos de concentração de PM_{10} , analisaram-se os campos de temperatura e velocidade do vento.

A Figura 5.9 mostra o gráfico que compara os valores simulados de concentração de PM_{10} nas condições originais e os simulados em que se retirou a vegetação existente no domínio.

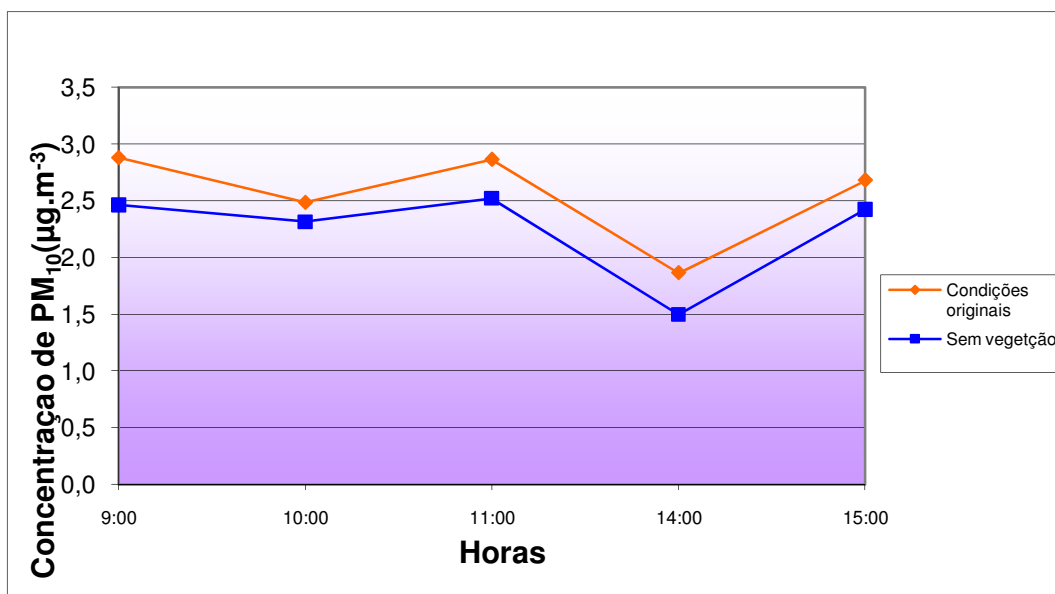


Figura 5.9 - Gráfico comparativo dos valores de PM₁₀ simulados para as condições originais e sem vegetação

Nota-se uma ligeira diminuição das concentrações de PM₁₀ na ausência de vegetação. Com o objectivo de melhor interpretar estes resultados, analisaram-se campos de concentrações, temperatura e velocidade do vento.

Nas Figuras 5.10 apresentam-se os campos horizontais, a uma altura de 2 metros, das concentrações de PM₁₀, às 11:30, simulados na situação de referência e sem qualquer vegetação.

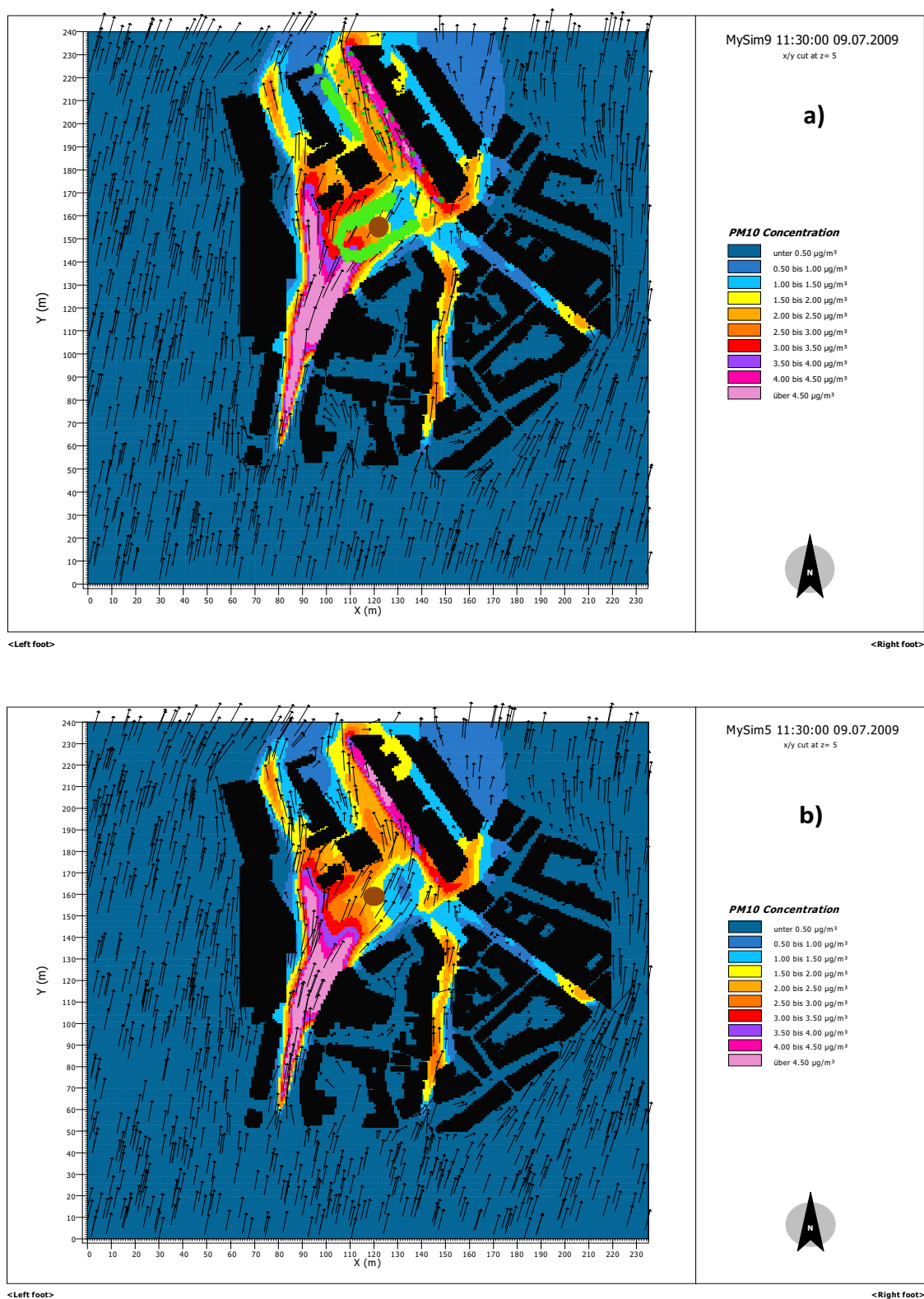


Figura 5.10 - Campo horizontal de concentrações de PM_{10} (altura 2 m) às 11:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referencia; b) sem vegetação

Analisando as Figuras 5.10 consegue-se perceber um aumento das concentrações junto das árvores, que pode ser devido à direcção do vento arrastar os poluentes para junto das mesmas. Sem a vegetação os poluentes não encontram obstáculos e dispersam mais. A velocidade do vento também pode contribuir para esta diminuição, por isso nas Figuras 5.11 analisa-se a velocidade do vento para as 11:30 do dia 9 de Julho.

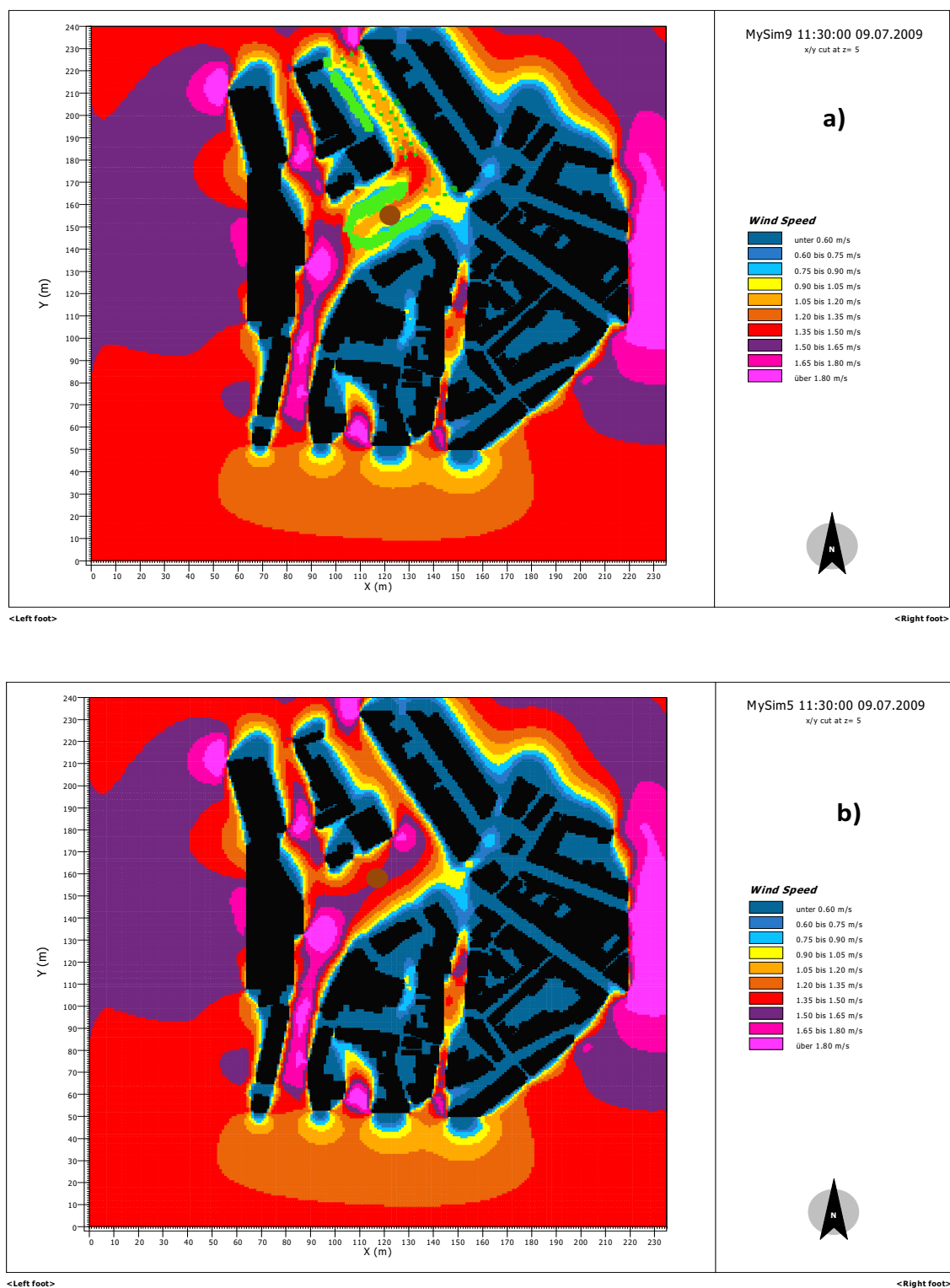


Figura 5.11- Campo horizontal de velocidade do vento (altura 2 m) às 11:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação

A comparação das Figuras 5.11 a) e b) mostra que a velocidade do vento aumenta na ausência da vegetação, o que permite uma maior dispersão e consequentemente provoca uma diminuição das concentrações de PM_{10} .

Por último, vários estudos referem que a temperatura diminui com a presença de vegetação, o que é um factor importante para a qualidade de vida, e por isso analisaram-se campos de temperatura com e sem vegetação nas Figura 5.12.

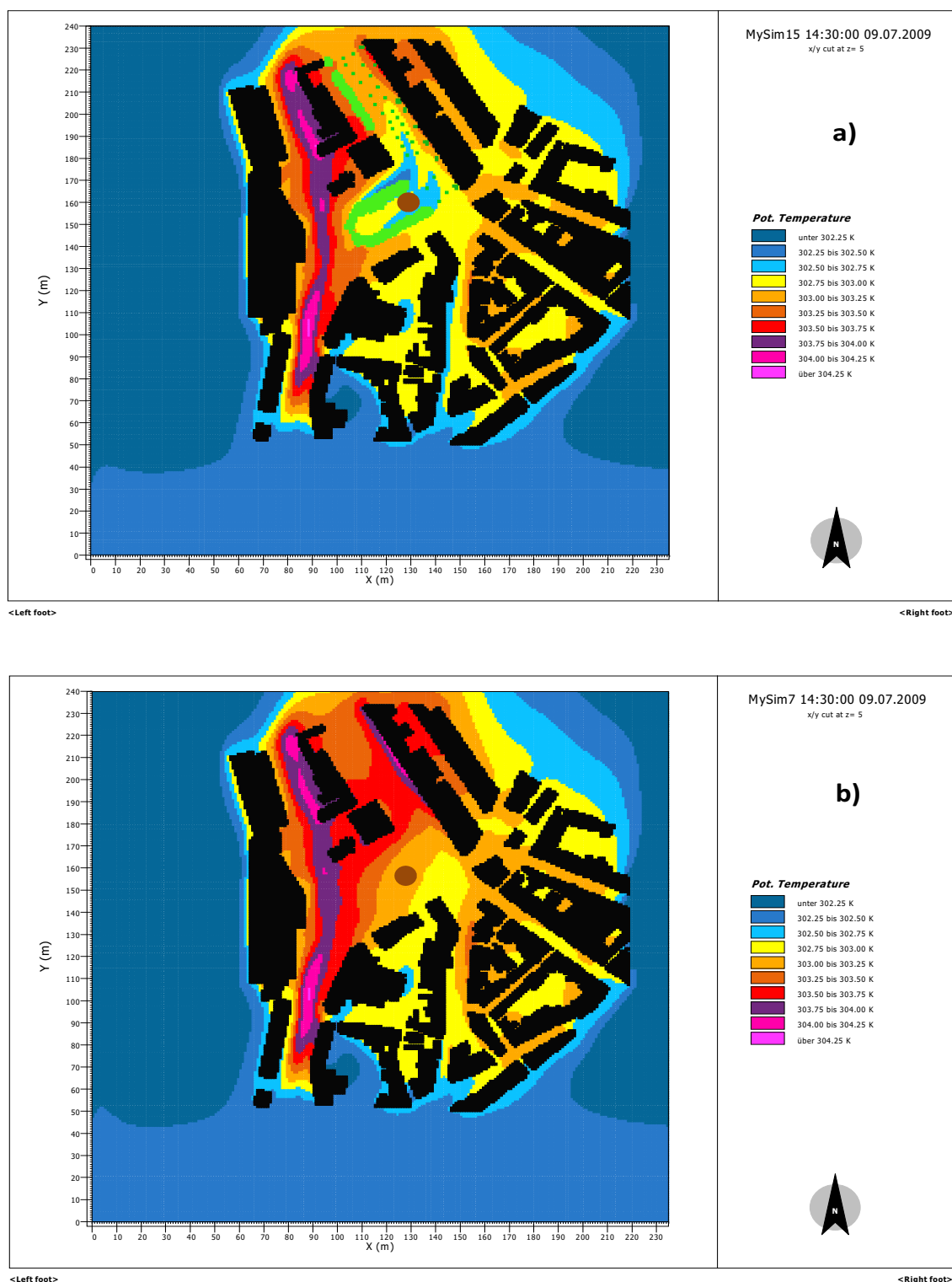


Figura 5.12 - Campo horizontal da temperatura (altura 2 m) às 14:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referencia; b) sem vegetação

As Figuras 5.12 mostram claramente uma diminuição da temperatura junto das árvores. No local onde as medições foram efectuadas essa diminuição é da ordem dos

0,5 °C.

6 Conclusão

As simulações realizadas com o modelo Envi-met, no âmbito deste trabalho demonstram que as concentrações de PM_{10} , dependem da velocidade e direcção do vento, do tráfego e da presença de vegetação.

O modelo Envi-met, utilizado no presente estudo, demonstrou ter capacidade de simular o escoamento atmosférico, permitindo contabilizar o efeito exercido pela vegetação na velocidade e temperatura, e consequentemente na qualidade do ar.

Da análise das concentrações de PM_{10} , verificou-se que o Envi-met calcula valores de concentração ligeiramente mais baixos que os medidos no local de estudo. A causa desse desvio entre valores de PM_{10} , simulados e medidos não foi encontrada, porém seria importante analisar, através de outras metodologias, se tal facto resulta de uma subestimativa das concentrações pelo Envi-met, ou do facto de não se terem considerado outras fontes emissoras, bem como as concentrações de background.

A análise comparativa dos valores medidos e simulados permite verificar uma tendência semelhante o longo do dia, à excepção das primeiras e últimas horas do período em análise.

Verifica-se que a existência de vegetação contribui para uma diminuição da temperatura, e que de maneira geral a sua ausência aumenta a velocidade do vento, mas é preciso ter em conta que estes efeitos são muito localizados e que a alteração das características físicas dos espaço e meteorológicas pode levar a resultados diferentes.

Do presente estudo pode concluir-se que Bragança apresenta valores baixos de PM_{10} , o que era espectável tendo em conta que Bragança é uma cidade pouco

industrializada e com um volume de tráfego não muito elevado.

Referências bibliográficas

- Akbari, H.; Davis, S.; Dorsano, S.; Huang, J.; Winnett, S. (1992). *Cooling Our Communities: A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing*. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 156 pp.
- Amorim, J. H. (2003). *Modelação do escoamento e da dispersão de poluentes atmosféricos em áreas urbanas; Dissertação de Mestrado em Poluição Atmosférica; Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Aveiro, Portugal; 130 pp.*
- Brunet, Y.; Irvine, M. R. (2000). The Control of Coherent Eddies in Vegetation Canopies: Streamwise Structure Spacing, Canopy shear Scale and Atmospheric Stability, *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 94, Issue 1, pp. 139-163.
- Bruse, M. (1999). *Modelling and Strategies for improved urban climates; Invited Paper In: Proceedings International Conference on Urban Climatology & International Congress of Biometeorology, Sydney, 8-12. Nov, Australia, 6pp.*
- Bruse, M.; Skinner, C. L. (1999). *Rooftop Greening and local climate: A case study in Melbourne. Paper, Poster In: Proceedings International Conference on Urban Climatology & International Congress of Biometeorology, Sydney, 8-12. Nov, Australia, 6 pages (and in), (2000): --, Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millenium, WMO/TD No. 1026, World Meteorological Organisation, Geneva, CH, ISBN 92-63-01026-9, 6pp.*
- Bruse, M (2008). *Envi-met 3.1 Manual*.
- EC (2000). *Design for Living – the European City of Tomorrow; EUR 19831; European Commission; Energy, Environment and Sustainable Development; Belgium.*
- Faisal, I. Khan and Abbasi, S. A. (1999). *Attenuation of gaseous pollutants by greenbelts, Computer Aided Environmental Management Unit, Centre for Pollution Control and Energy Technology, Pondicherry University, Pondicherry, India*
- Fischesser, B. (1981). *Conhecer as árvores. Publicações Europa-América, Lisboa. 275 pp.*
- Freer-Smith P.H., Broadmeadow, M.S.J. (1996). *The improvement of Urban Air Quality by Trees. Arboriculture Research and Information Note 135-ERB-96. Arboriculture Research and Information Note 135 – ERB – 96. Arboriculture Advisory and Information Service, Farnham, Surrey.*
- Heisler, G.M. (1986). *Energy savings with trees. Journal of Arboriculture 12 (5): 113-125.*
- Kolic, B. (1978). *Forest Ecoclimatology (in Serbian), University of Belgrade, 295 pp.*
-

- Lalic, B.; Mihailovic, D.T. (2004). An Empirical Relation Describing Leaf-Area Density Inside the Forest for Environmental Modelling, *Journal of applied meteorology*, vol.7, pp: 641-645.
- Larcher, W. (1995). *Physiological Plant Ecology*, 3rd edition, Springer.
- Launder, B.E., Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows, *Comp. Methods appl. Mech. Eng.* 3:pp: 269-289.
- Magalhães, M. R. A. (2001). *Arquitectura Paisagista, morfologia e complexidade*. Editorial Estampa, Lisboa. 525 pp.
- McPherson, G.; Nowak, D. Rowntree, R. (1994). Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago urban forest climate project. General Technical Report Northeastern Forest Experiment Station, USDA Forest Service, No NE-186. 201 pp.
- McPherson, E. G.; Simpson, J.; Peper, P.; Scott, K.; Xiao, Q. (2000). Tree guidelines for Coastal Southern California Communities. Western Center for Urban Forest Research and Education, Center for Urban Forest Research, USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 98 pp.
- Meyer, B.; Anderson, D.; Böhning, R.; Fratiante, D. (1973). *Introdução à fisiologia vegetal*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 710 pp.
- Nowak, D. J. and Sisinni, S. (1993) "Plant Chemical Emissions". *Miniature Roseworld*, Vol. X (No. 1), pp. 4-6.
- Nowak, D. J. (2000). The effects of urban trees on air quality. USDA Forest Service, Syracuse, NY
- Nowak, D. J., (2001). The effects of Urban Forests on the Physical Environment. In: *Urban Forests and Trees*. Proceedings nº 1, COST ACTION E12, European Communities, Bruxelles, pp: 22-38.
- Nowak, D. J. (2006). Institutionalizing urban forestry as a "biotechnology" to improve environmental quality. *Urban Forestry and Urban Greening*, Vol. 5, pp. 93-100.
- Paolletti, E.; Karnosky, D.; Percy, K. (2004). Urban trees and air pollution. In: Konijnendijk, C.; Schipperijn, J.; Hoyer, K. (Eds), *Forestry Serving Urbanised Societies*. IUFRO World, Vienna. Series 14: 129-159.
- PNAAS (2007). *Plano Nacional de Acção Ambiente e Saúde*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional (Instituto do Ambiente) e Ministério da Saúde (Direcção-Geral da Saúde). Lisboa. 205 pp.
- Ridder, K.; Adamec, V.; Banuelos, A.; Bruse, M.; Burguer, M.; Damsgaard, O.; Dufek, J.; Hirsch, J.; Lefebre, F.; Pérez-Lacorzana, J. M.; Thierry, A.; Weber, C. (2004). An integrated methodology to assess the benefits of urban green space", *Science of the Total Environment*, Vol. 334, pp. 489-497.
-

- Rodrigues, V. M. (2009). Simulação do efeito da vegetação na qualidade do ar em zonas urbanas; Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente; Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Aveiro, Portugal; 138 pp.
- Rossa, G. D., Hope, E. S., Owen, S.M., Mackenzie, A.R. and Hewitt, C. N. (2005) Development and Application of an Urban Tree Air Quality Score for Photochemical Pollution Episodes Using the Birmingham, United Kingdom, Area as a Case Study". *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 39, pp. 6730-6738.
- Ruth, A. E. and William, R. E. (1994). *The Encyclopedia of the Environment*. The Rene Dubor Centre for Human Environments, Houghton Mifflin Company, U.S.A.
- Samet, J.M.; Schnatter, R. (1998). Invited Commentary: Epidemiology and Risk Assessment, *American Journal of Epidemiology*, volume 148, The Johns Hopkins University School of Hygiene and Public Health.
- Santos, J e Tavares, R (2004). Estudo do efeito da vegetação na dispersão de poluentes em zonas urbanas. Relatório Final do Projecto de Licenciatura em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento. Aveiro – Portugal.
- Seinfeld, J.H.; Pandis, S.N. (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics – from Air Pollution to Climate Change*, Jonh Wiley & Sons, Inc. Wiley Interscience.
- Taha, H. (1996). Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmos. Environ.*, Vol. 30 (20), pp. 3423-3420.
- Tryväinen, L.; Pauleit, S.; Seeland, K.; Vries, S. (2005). Benefits and uses of urban forest and trees. In: Konijnendijk, C.C.; Nilsson, K.; Randrup, T. B.; Schipperijn, J. (2005). *Urban Forests and Trees*, Springer, Berlin, pp: 81-114.
- Vareschi, V. (1960). Efectos del viento en los Llamos, durante la época de sequía. *Bol. Soc. Venez. Cienc. Nat.* 96 : 118-127.
- WHO (1999). *Guidelines for air quality*; World Health Organization; Geneve.
- WHO (2002). *Guidelines for Concentration and Exposure-Response Measurement of Fine and Ultra Fine Particulate Matter for Use in Epidemiological Studies*", Department of Protection of the Human Environment, World Health Organization.
- WHO (2003). *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide*, Regional Office for Europe, World Health Organization, Copenhagen.

URL1: www.mapadeportgal.net

URL2: www.cm-braganca.pt

Anexo A – Contagens de Tráfego

Tabela A 1 – Exemplo de dados referentes às contagens de tráfego realizadas

Local	7:50 - 8:00	8:10 - 8:20	8:25 - 8:35	8:45 - 8:55	9:05 - 9:15	9:20 - 9:30	9:40 - 9:50
Av. Sá Carneiro (1.1)	107						
Rua D. Aleixo Miranda (1.3)	30						
Rua 5 de Outubro (2.1)		44					
Rua Almirante Reis (2.2)		40					
Rua Nova do Cemitério (2.3)		83					
Rua em frente aos correios (2.4)		37					
Praça Cavaleiro Ferreira1 (2.5)		44					
Av. João da Cruz1 (2.6)		42					
Av. João da Cruz2 (2.7)		85					
Praça Cavaleiro Ferreira3 (3.1)			1				
Praça Cavaleiro Ferreira4 (3.2)			28				
Av. Sá Carneiro (Shopping) (3.3)			85				
Rua Alexandre Herculano(4.1)				110			
Rua da República (5.1)				46			
Praça da Sé (5.2)				26			
Rotunda2 (6.1)					68		
Av João da Cruz3 (6.2)					55		
Av. General Humberto Delgado (6.3)					123		
Rua de Santo António (6.4)					35		
Rua Guerra Junqueiro (7.1)						11	
Av João da Cruz4 (8.1)						31	
Praça Cavaleiro Ferreira2 (8.2)						46	
Rotunda1 (8.3)						64	
Rua da Escola (9)							90

Anexo B – Aplicação do modelo Envi-met no caso de estudo

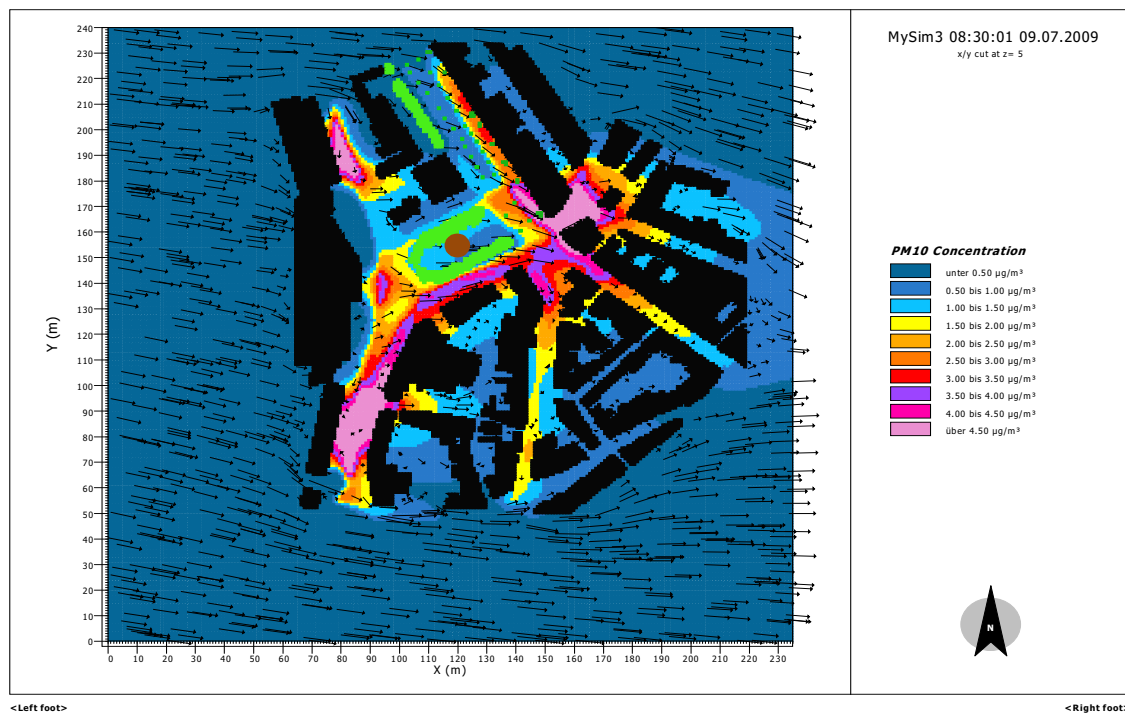


Figura B 1 - Campo horizontal de concentrações de PM₁₀ (altura 2 m) às 8:30 do dia 9 de Julho de 2009.

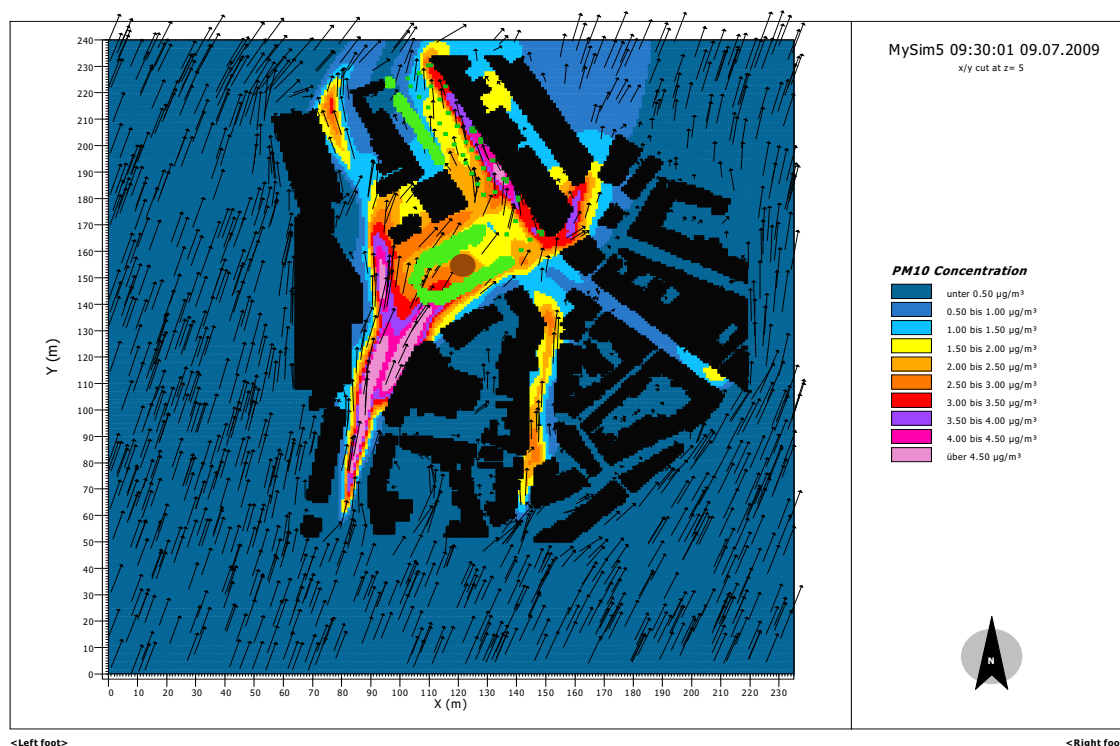


Figura B 2- Campo horizontal de concentrações de PM₁₀ (altura 2 m) às 9:30 do dia 9 de Julho de 2009.

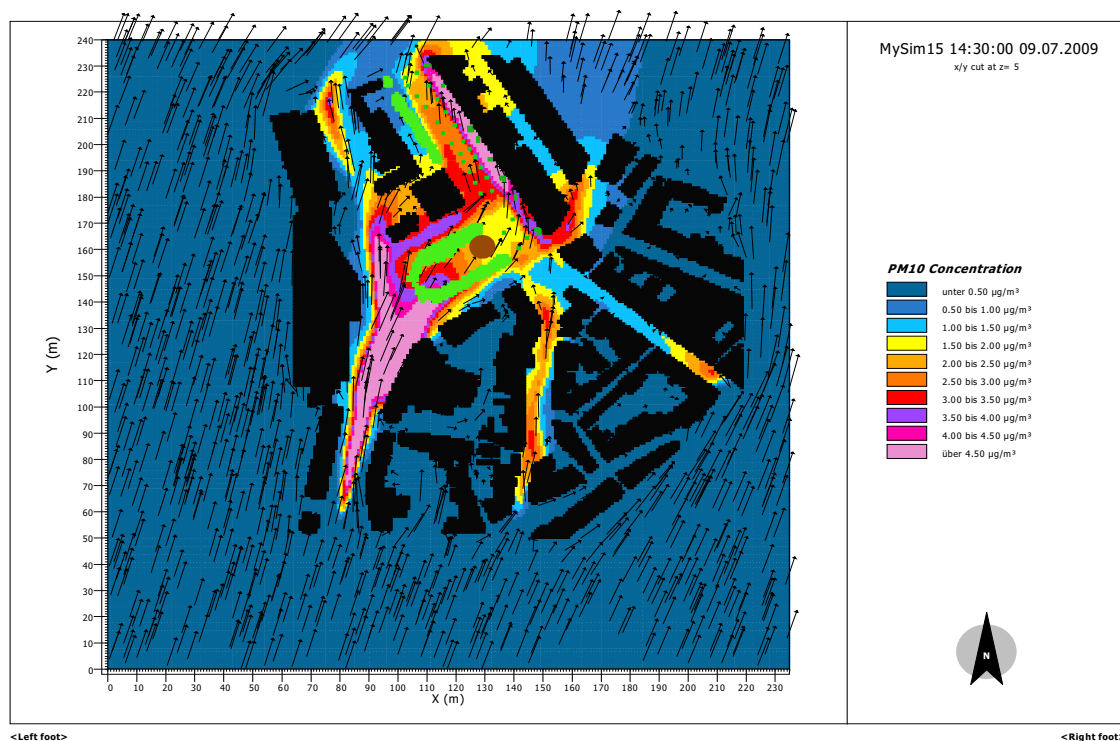


Figura B 3 - Campo horizontal de concentrações de PM₁₀ (altura 2 m) às 14:30 do dia 9 de Julho de 2009.

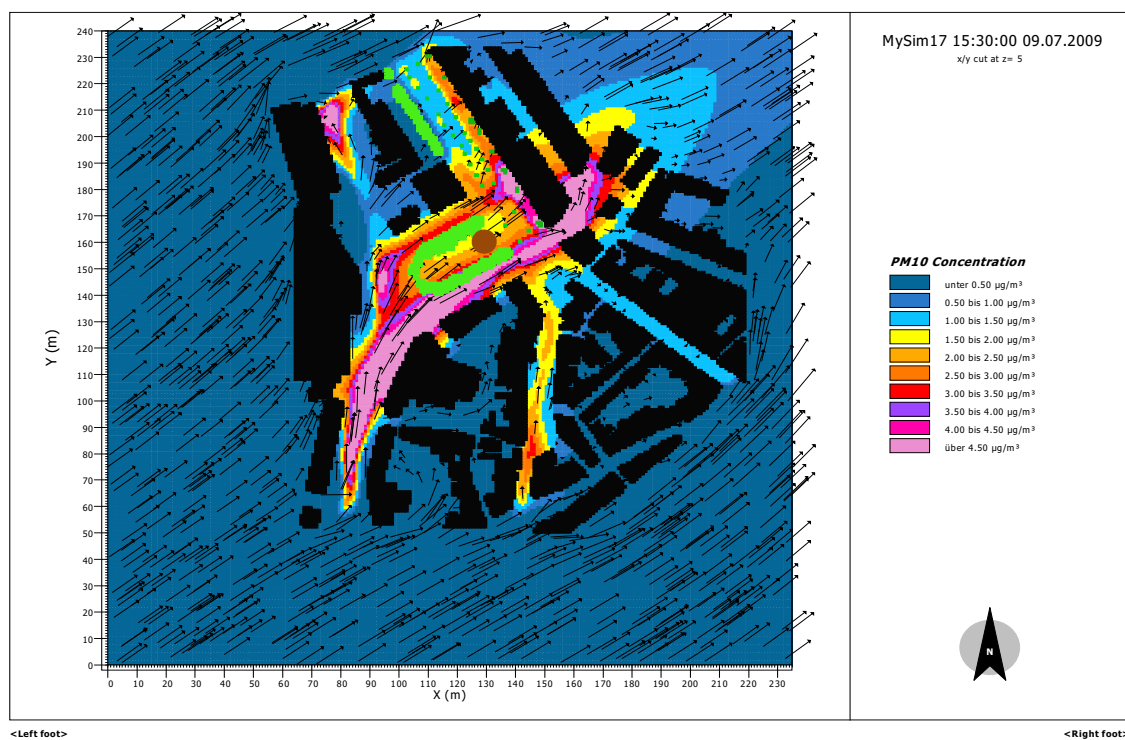


Figura B 4 - Campo horizontal de concentrações de PM_{10} (altura 2 m) às 15:30 do dia 9 de Julho de 2009.

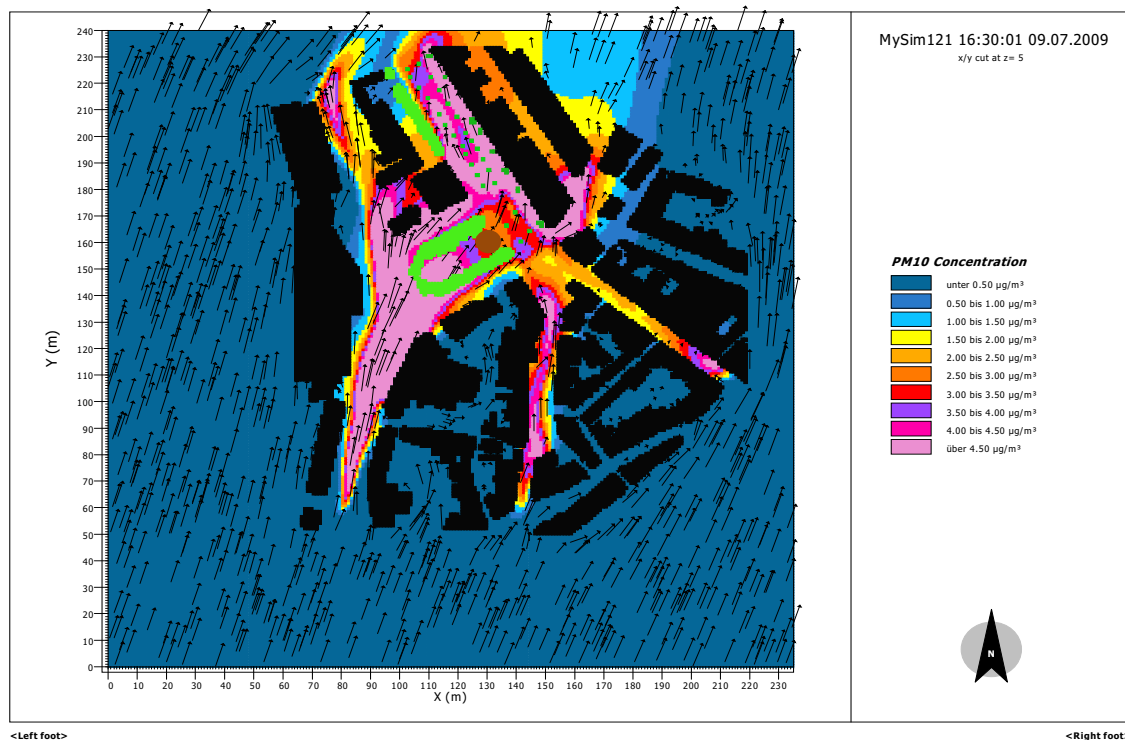


Figura B 5 - Campo horizontal de concentrações de PM_{10} (altura 2 m) às 16:30 do dia 9 de Julho de 2009.

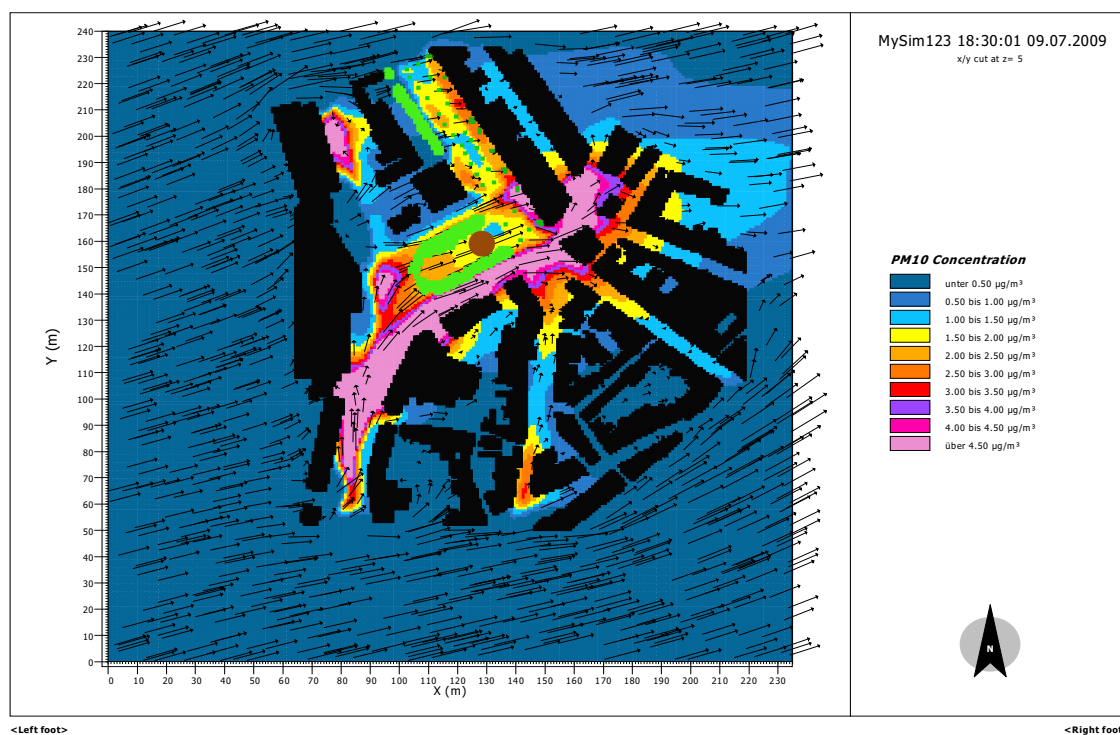


Figura B 6 - Campo horizontal de concentrações de PM_{10} (altura 2 m) às 18:30 do dia 9 de Julho de 2009.

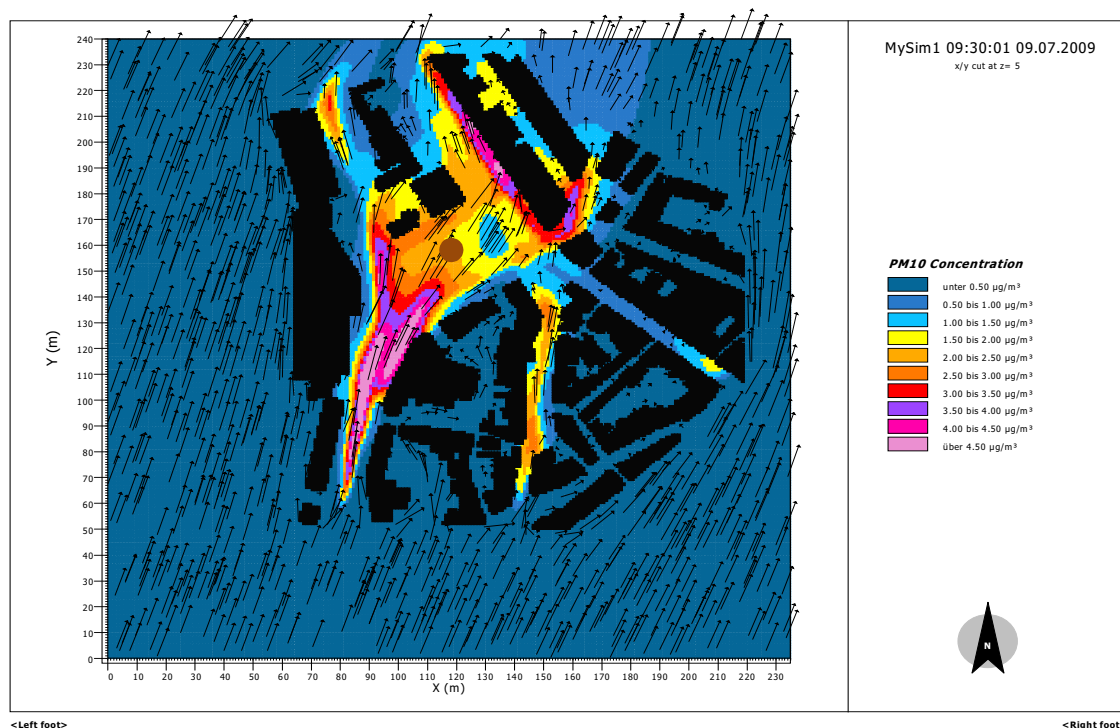


Figura B 7 - Campo horizontal de concentrações de PM_{10} (altura 2 m) às 9:30 do dia 9 de Julho de 2009, sem vegetação.

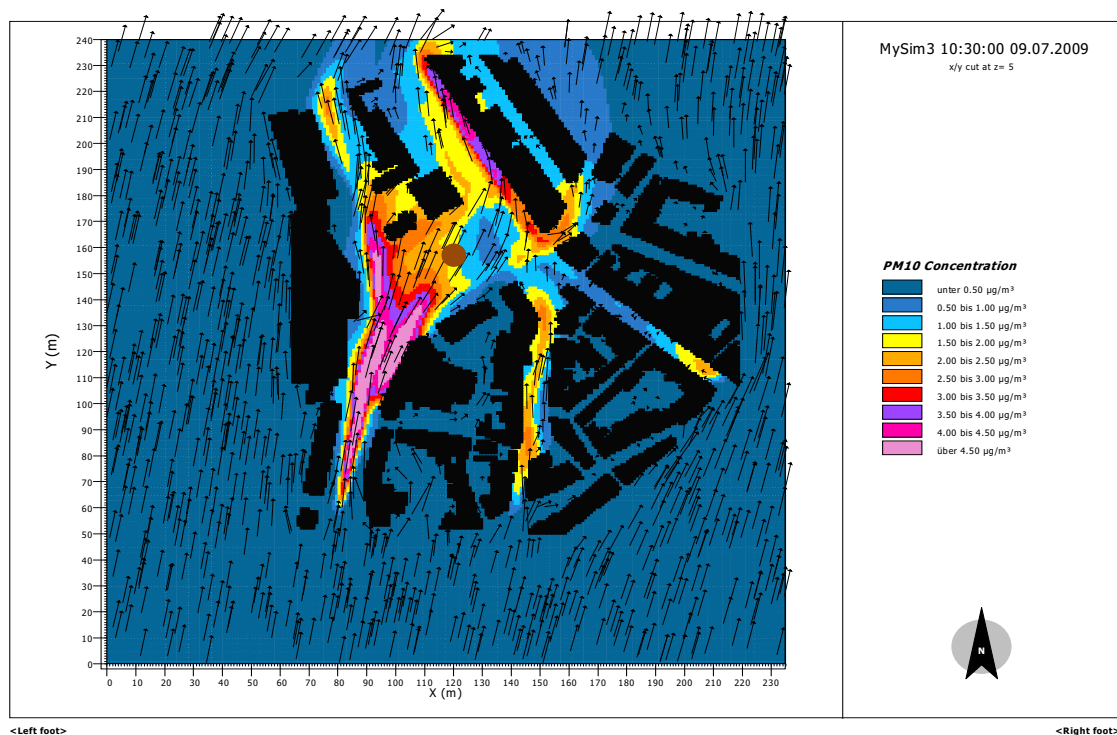


Figura B 8 - Campo horizontal de concentrações de PM_{10} (altura 2 m) às 10:30 do dia 9 de Julho de 2009, sem vegetação.

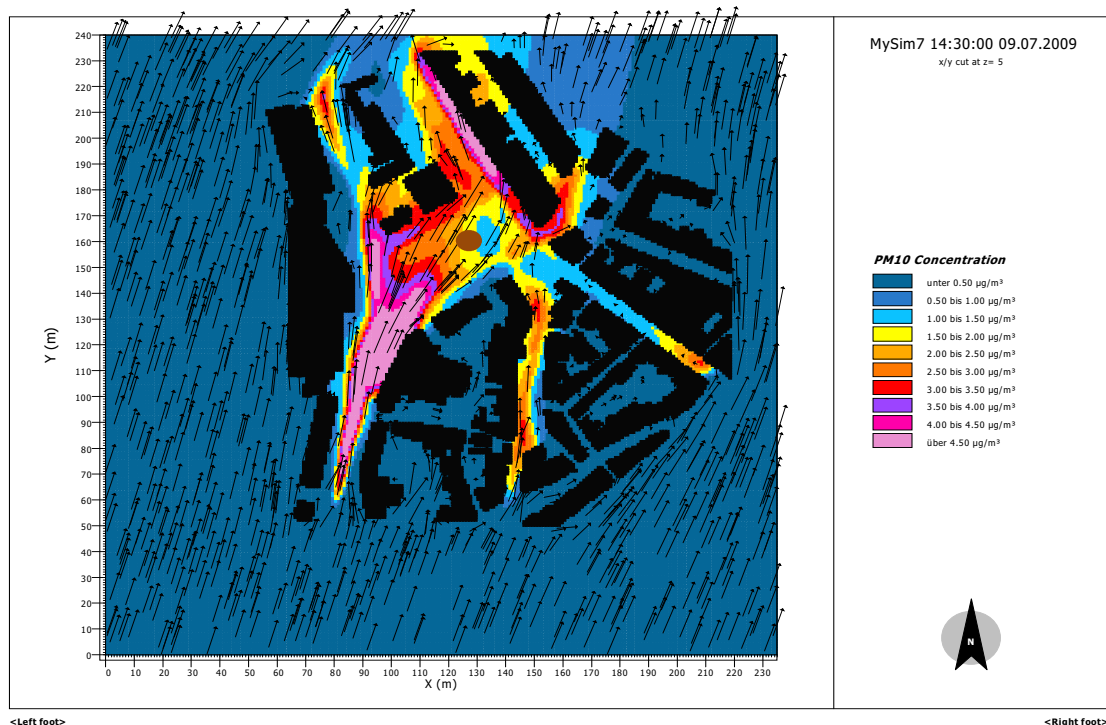


Figura B 9 - Campo horizontal de concentrações de PM_{10} (altura 2 m) às 14:30 do dia 9 de Julho de 2009, sem vegetação.

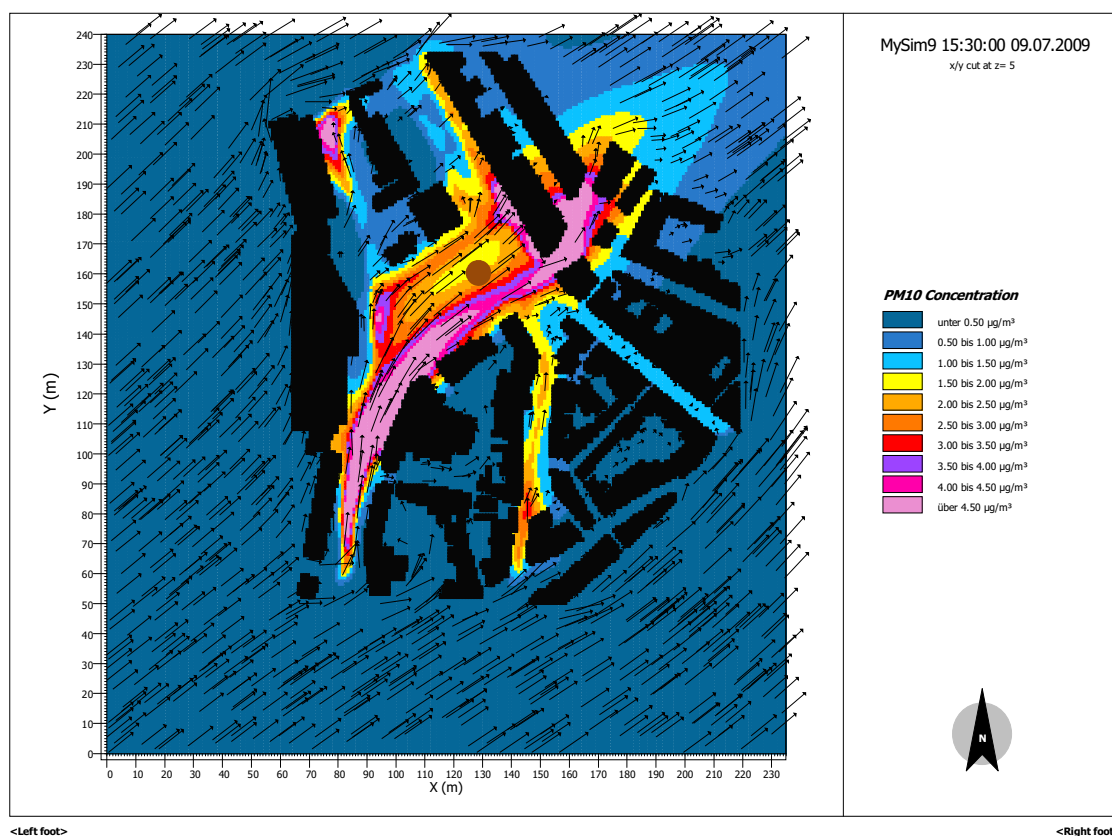


Figura B 10 - Campo horizontal de concentrações de PM_{10} (altura 2 m) às 15:30 do dia 9 de Julho de 2009, sem vegetação.

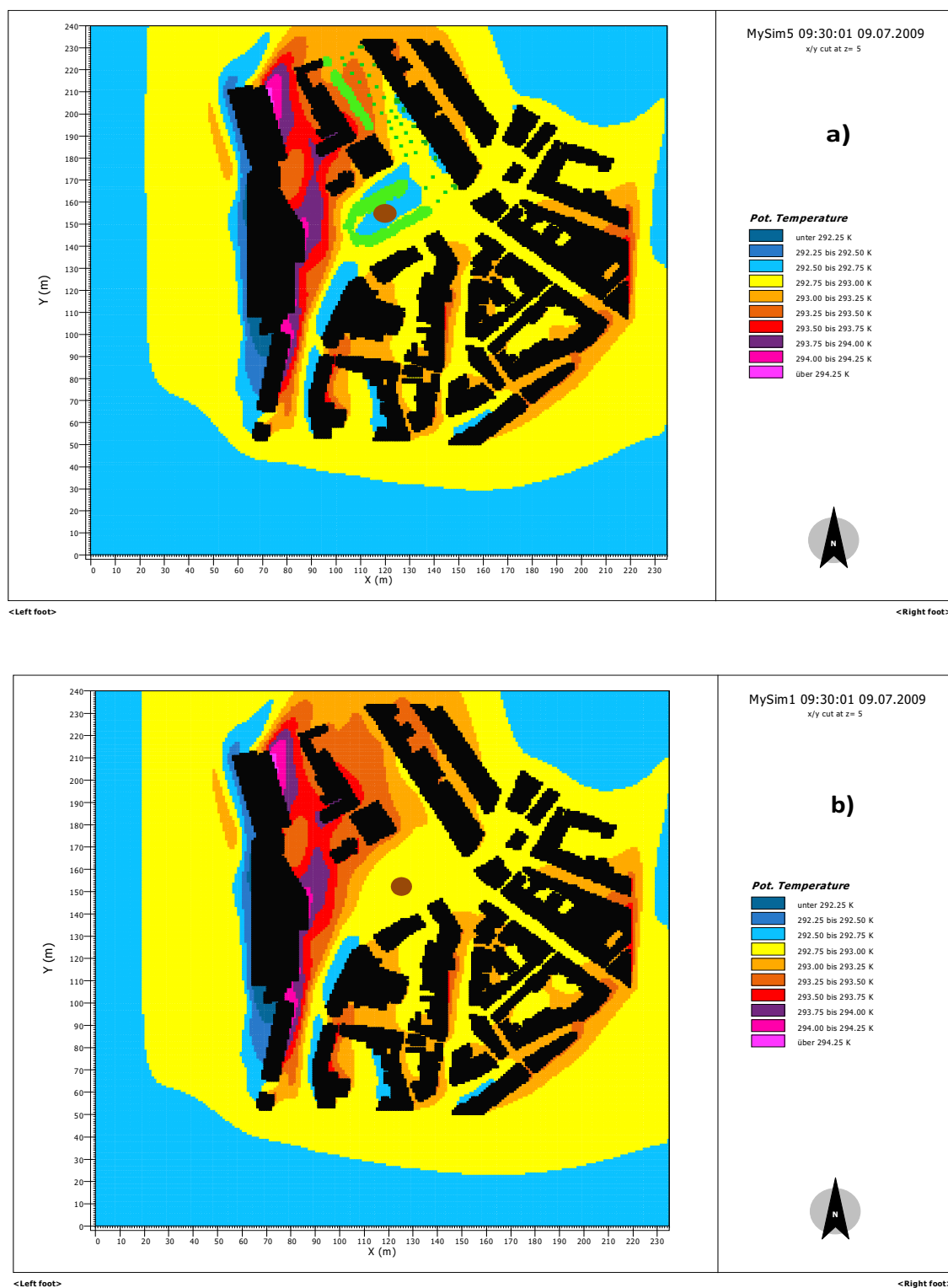


Figura B 11 - Campo horizontal da temperatura (altura 2 m) às 9:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação

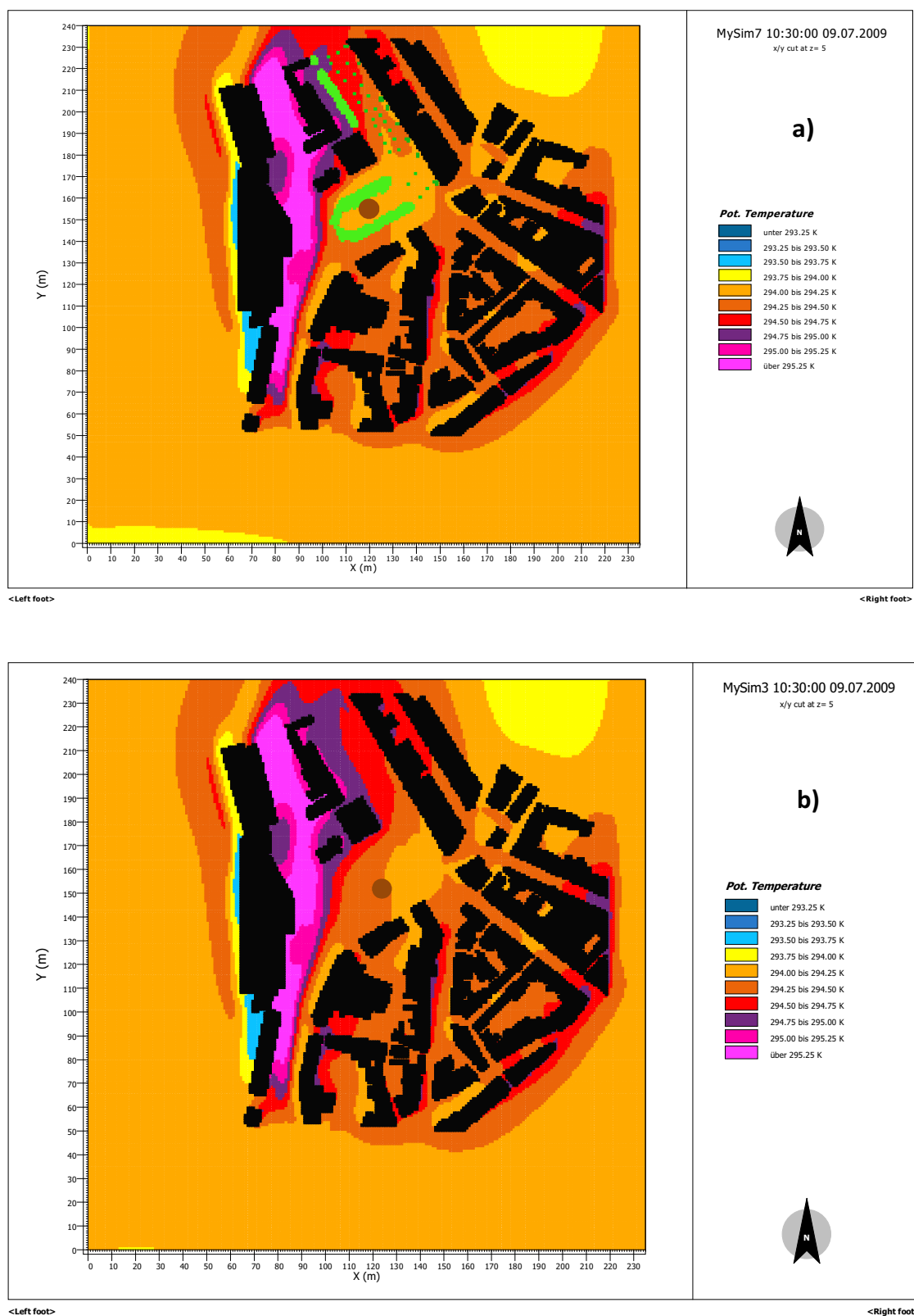


Figura B 12 - Campo horizontal da temperatura (altura 2 m) às 9:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação.

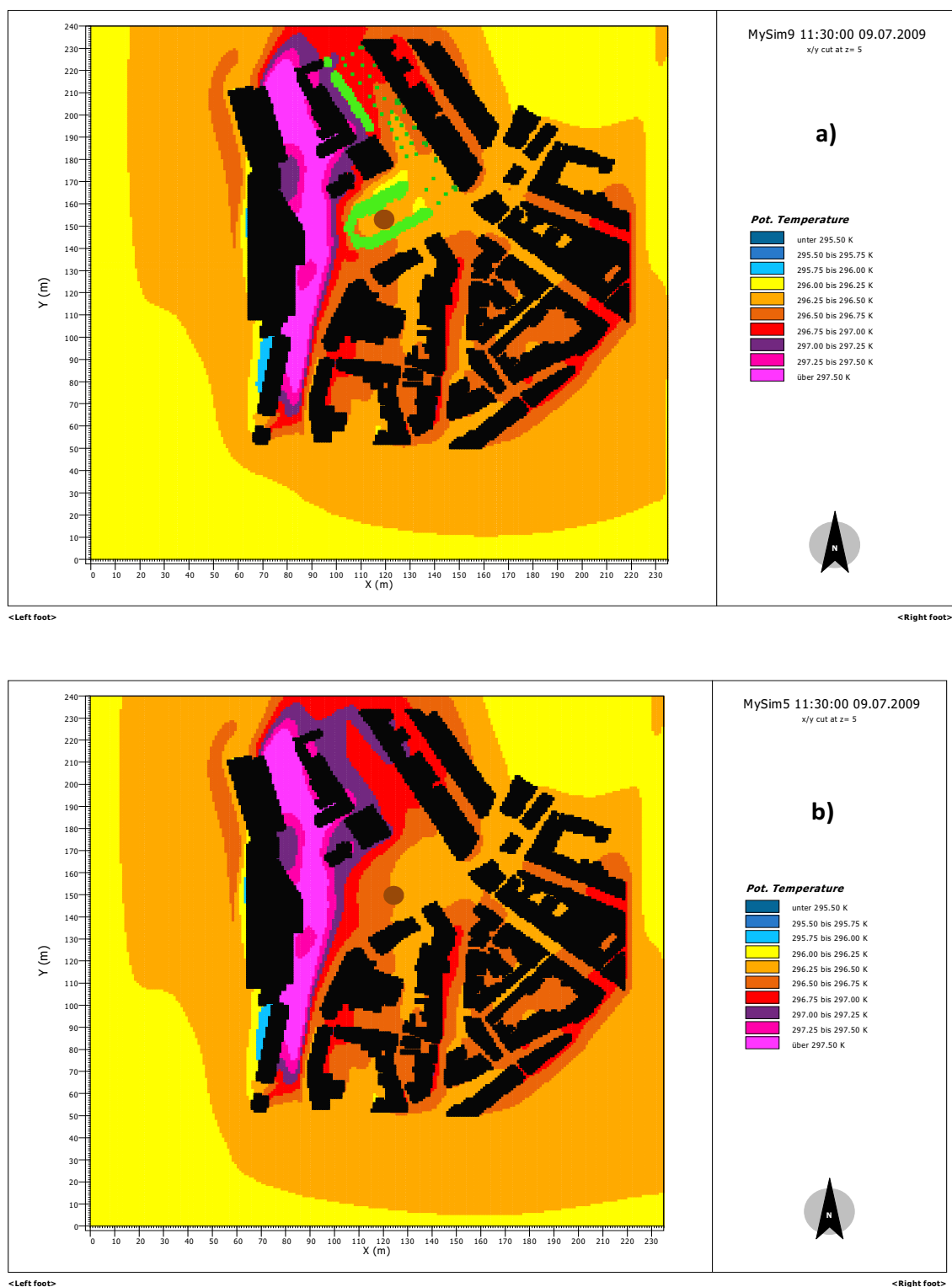


Figura B 13 - Campo horizontal da temperatura (altura 2 m) às 11:30 do dia 9 de Julho de 2009.
a) situação de referência; b) sem vegetação.

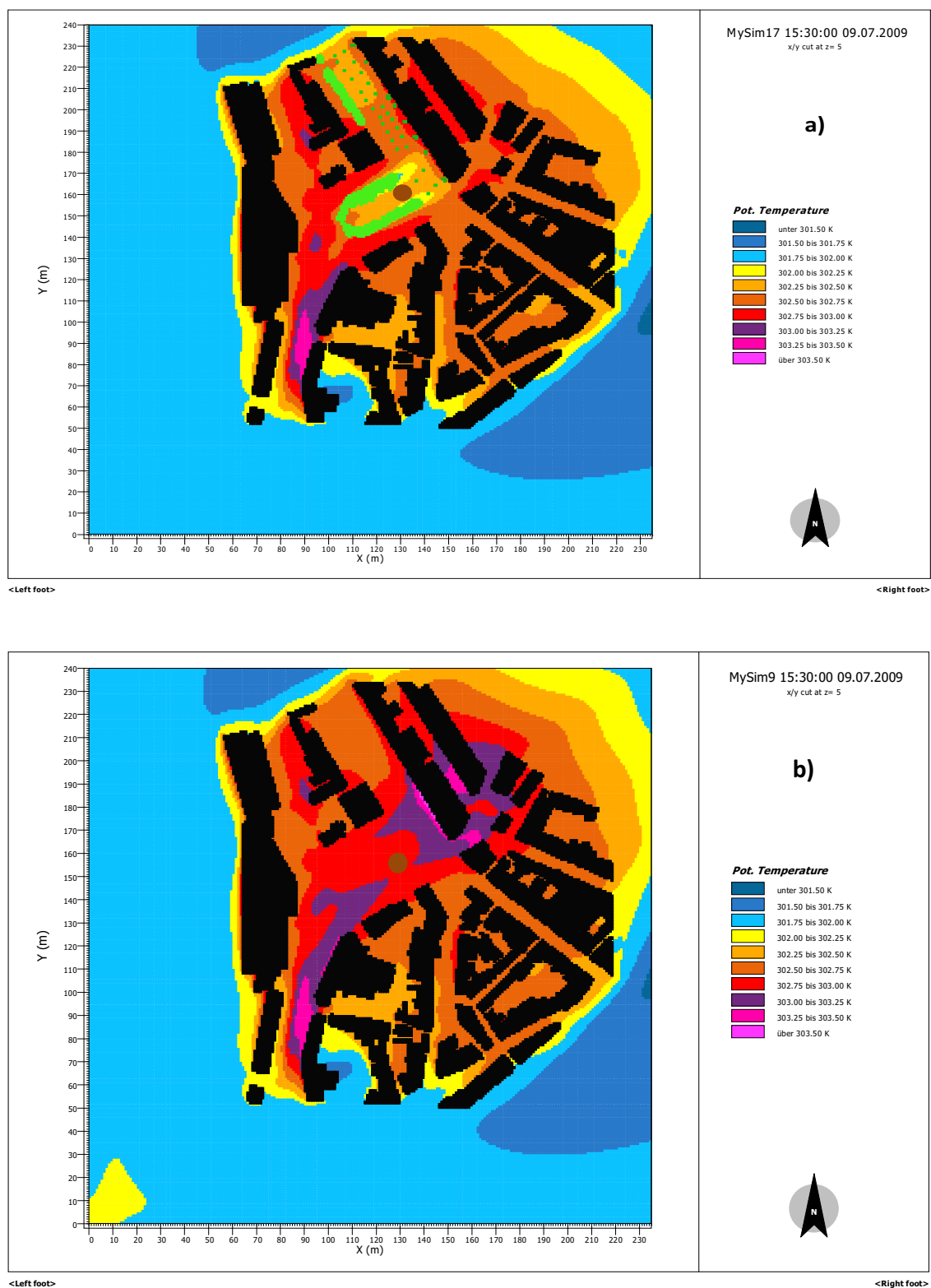


Figura B 14 - Campo horizontal da temperatura (altura 2 m) às 15:30 do dia 9 de Julho de 2009.
a) situação de referência; b) sem vegetação.

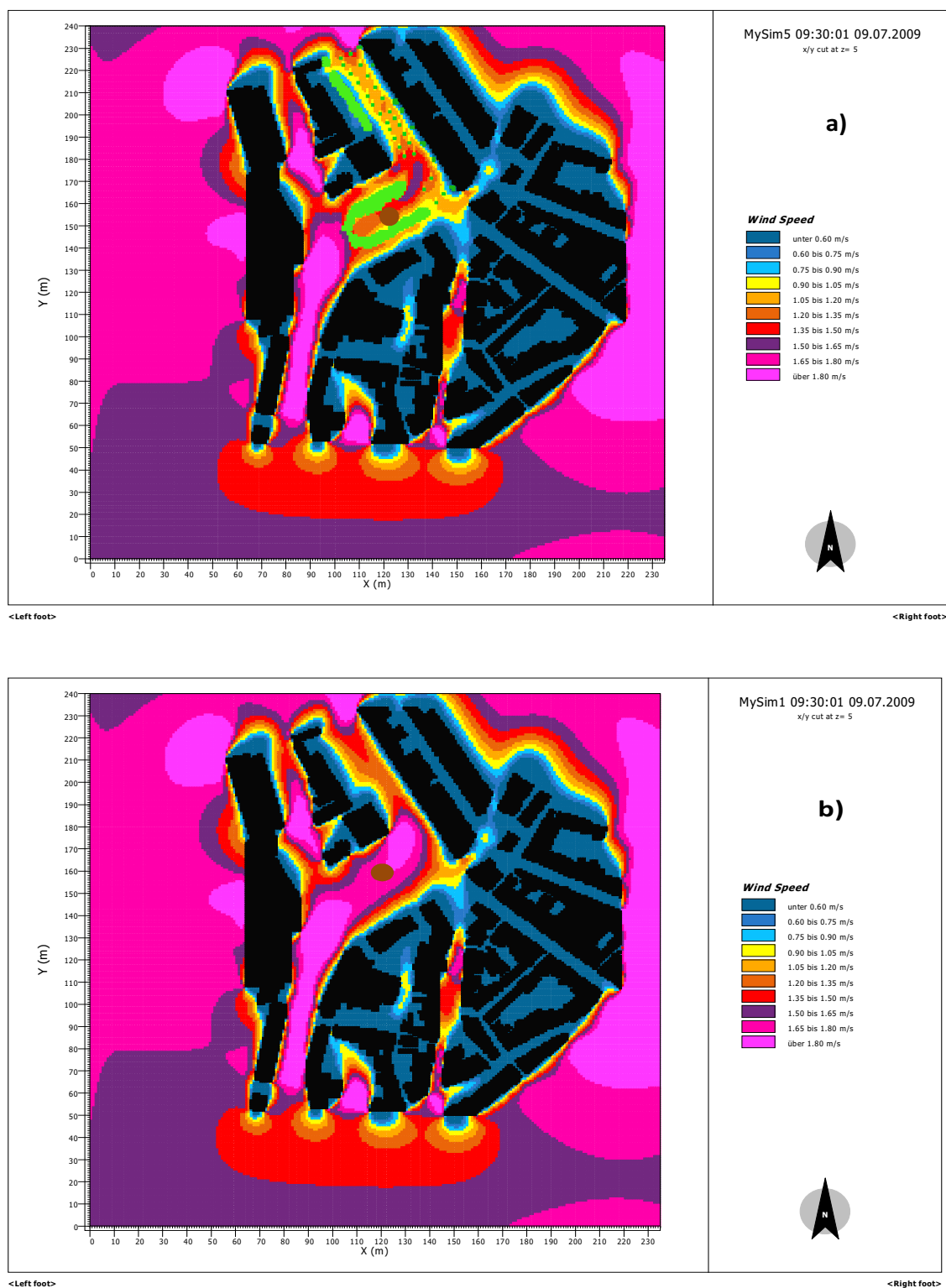


Figura B 15 - Campo horizontal de velocidade do vento (altura 2 m) às 9:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação

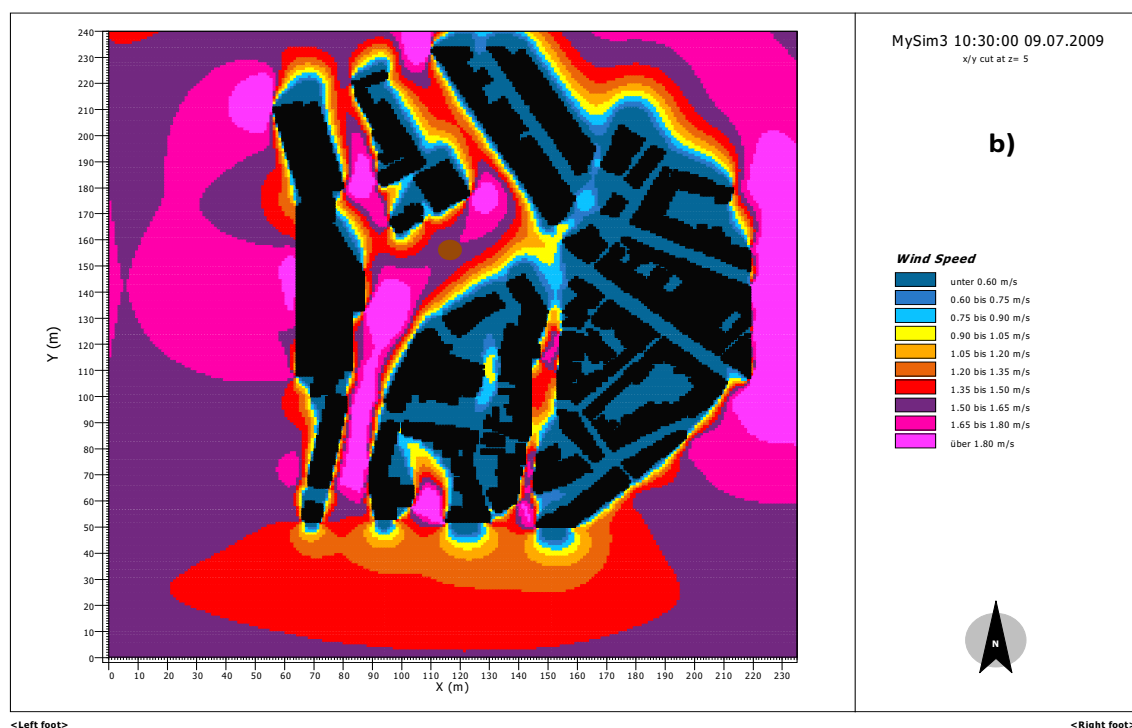
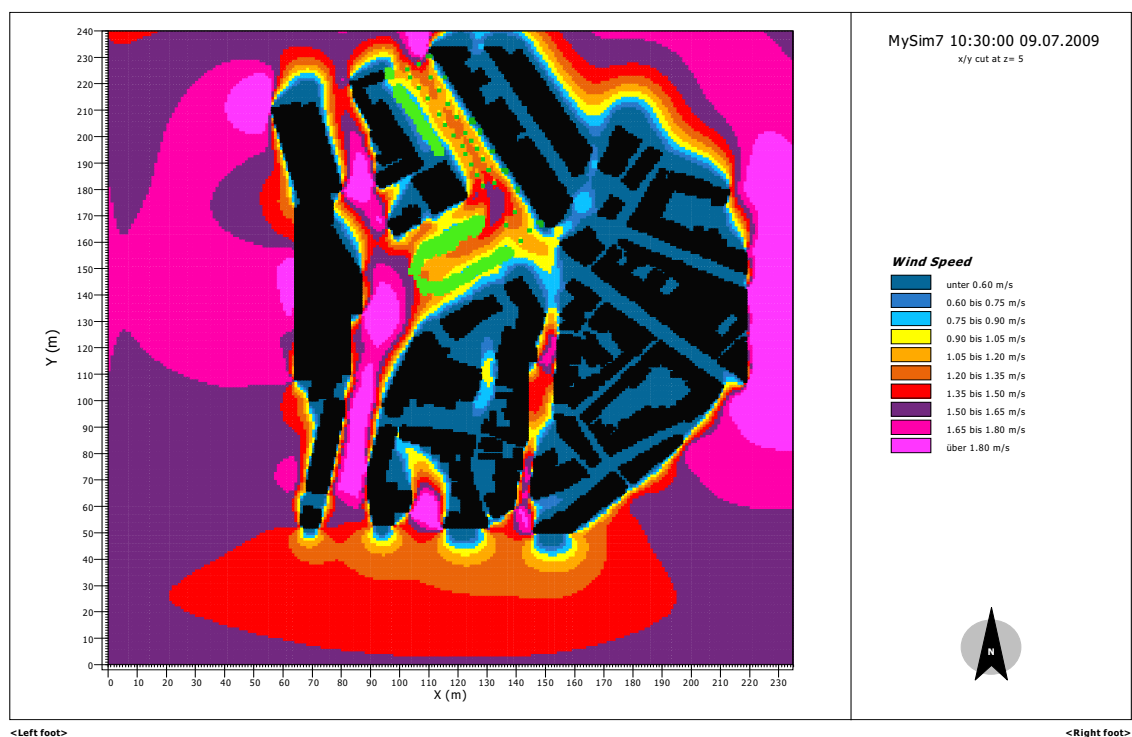


Figura B 16 - Campo horizontal de velocidade do vento (altura 2 m) às 10:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação

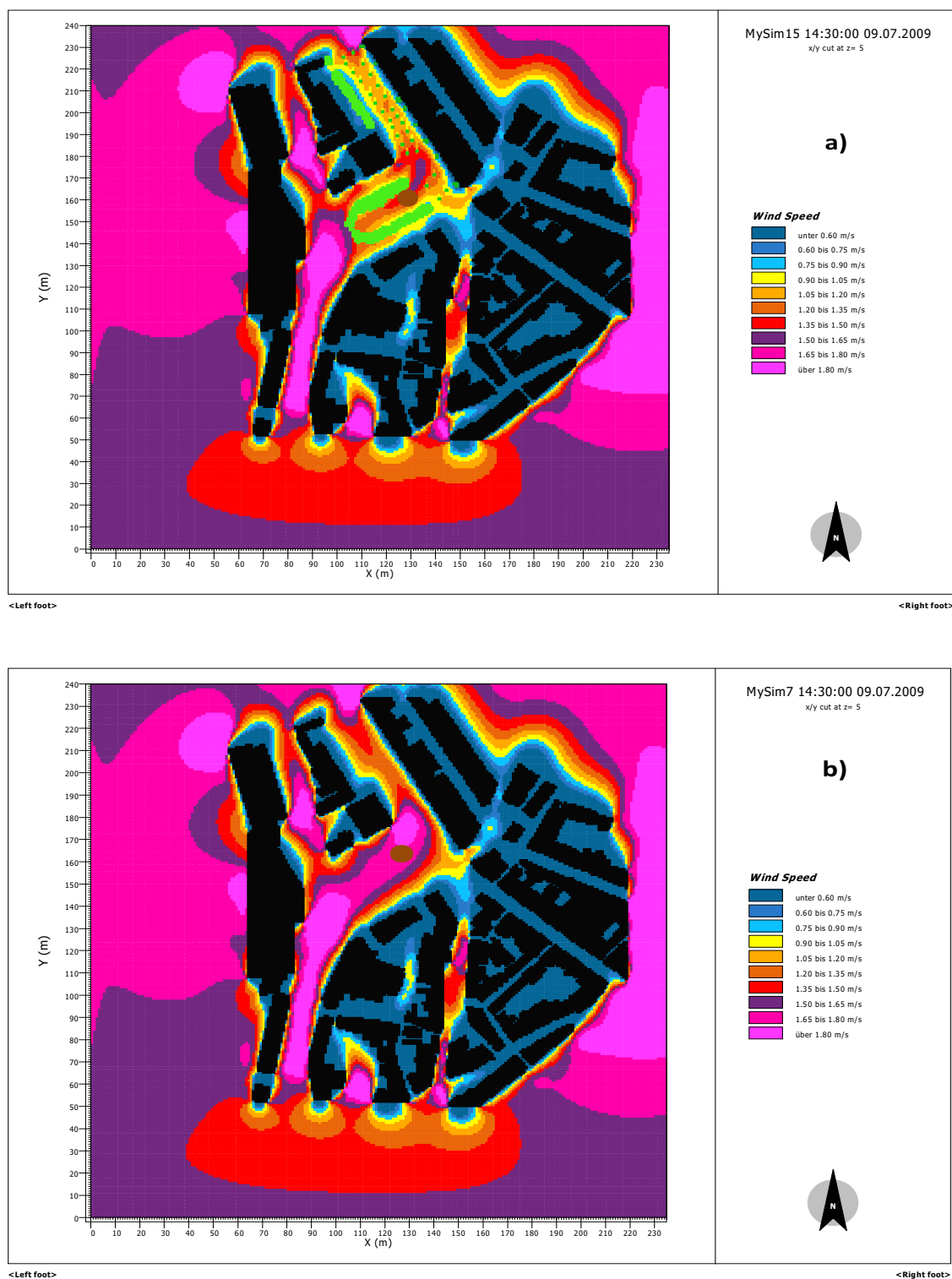


Figura B 17 - Campo horizontal de velocidade do vento (altura 2 m) às 14:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação

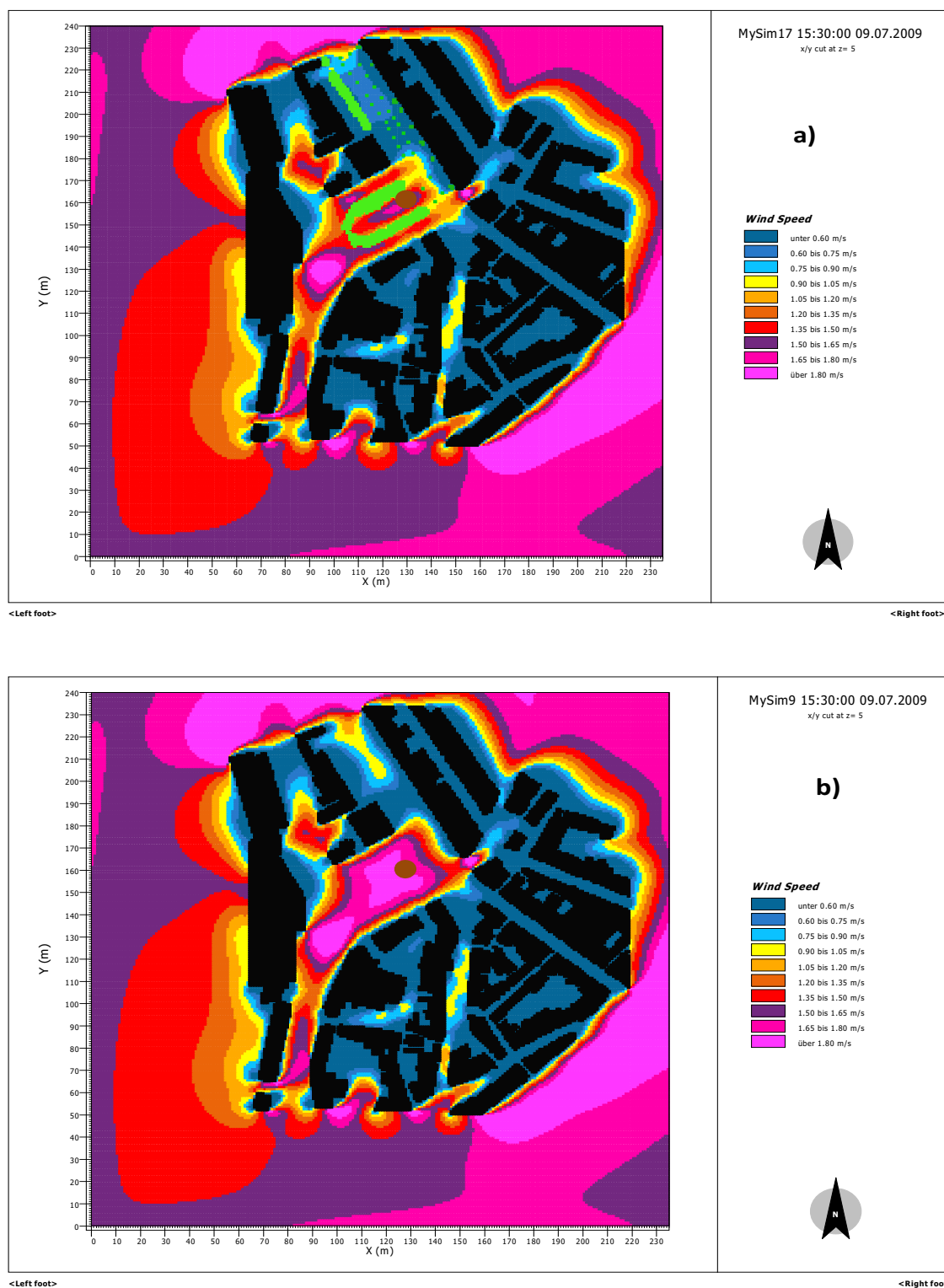


Figura B 18 - Campo horizontal de velocidade do vento (altura 2 m) às 10:30 do dia 9 de Julho de 2009. a) situação de referência; b) sem vegetação